

Tartu Ülikool
Loodus- ja täppisteaduste valdkond
Ökoloogia ja maateaduste instituut
Geograafia osakond

**ILMASTIKU JA TAIMESTIKU MÕJU CO₂ SIDUMISE
EFEKTIIVSUSELE HALJASKATUSEL**

Bakalaureusetöö keskkonnatehnoloogia erialal (12 EAP)

Annette Kägu

Juhendaja: Alar Teemusk, PhD

Kaitsmisele lubatud:

Juhendaja:
allkiri, kuupäev

Tartu 2018

ILMASTIKU JA TAIMESTIKU MÕJU CO₂ SIDUMISE EFEKTIIVSUSELE HALJASKATUSEL

Käesoleva töö eesmärgiks oli hinnata, kuidas mõjutab sammal kolme erineva kukeharja liigi võimet siduda haljaskatusel süsihappegaasi ja kuidas mõjutavad vooge meteoroloogilised näitajad. Töö käigus viidi läbi mõõtmised Palamuse vallamaja matipõhisel haljaskatusel dünaamilise suletud kambri meetodil. Saadud süsihappegaasi voogude põhjal analüüsiti tulemuste seoseid meteoroloogiliste näitajatega ja arvutati NPP (*net primary production*). Sammaldel oli positiivne mõju kukeharjade süsinikusiduvuse parandamisele. Kõige efektiivsemalt sidus süsinikku kamtsatka kukehari. Suurimat mõju süsihappegaasi voogudele avaldasid läbipaistva kambri puhul niiskus mullas, suhteline õhuniiskus ja päikesekiirguse intensiivsus, pimedas kambri korral suhteline õhuniiskus ja arvutatud NPP-le taimeosakaal.

Märksõnad: NPP, haljaskatus, süsiniku sidumine

CERCS kood: T270 – Keskkonnatehnoloogia, reostuskontroll

THE IMPACT OF WEATHER AND VEGETATION ON THE EFFECTIVENESS OF CARBON SEQUESTRATION ON GREEN ROOF

The aim of this study was to evaluate how moss influences the *Sedum* plants from three different species ability to sequester carbon dioxide on green roof and how the meteorological parameters affect fluxes. The measurements using closed dynamic chamber method were carried out on the green roof with pre-grown sedum mats in Palamuse. The connections between carbon dioxide fluxes and meteorological parameters were analysed and NPP (net primary production) was calculated based on the results from measurements. Mosses had positive effect on the *Sedum* plants ability to sequester carbon dioxide. The highest amount of carbon was sequestered by *Sedum kamtschaticum*. The fluxes from NEE measurements were affected by the soil humidity, relative humidity and global radiation; fluxes from ER measurements were affected by relative air humidity and the NPP by the proportion of vegetation cover.

Keywords: NPP, green roof, carbon sequestration

CERCS code: T270 – Environmental technology, pollution control

Sisukord

Sissejuhatus	4
1. Teoreetiline osa.....	5
1.1. Haljaskatuste mõiste ja liigitus ning kasulikud omadused	5
1.2. Taimed	8
1.3. Protsesside kirjeldus ja maailmas läbiviidud uuringud	8
1.3.1. CO ₂ vood linnakeskkonnas.....	8
1.3.2. CO ₂ mõõtmised haljaskatustelt.....	11
2. Materjal ja metoodika.....	13
2.1. Mõõtmisala kirjeldus	13
2.2. Välitööde metoodika	14
2.3. Statistiline andmeanalüüs	15
3. Tulemused	17
3.1. Mõõtmiste CO ₂ vood.....	17
3.2. CO ₂ voo ning NPP sõltuvus ilmastikust	25
4. Arutelu	29
Kokkuvõte	32
Summary.....	34
Tänuavaldused.....	36
Kasutatud allikad	37
Lisa 1. Gaasivoo mõõtmiseks paigaldatud rõngaste taimekooslused.....	41
Lisa 2. Ilmastikuparameetrite ja CO ₂ vaheliste seoste uurimiseks programmiga Statistica koostatud korrelatsioonitabel.....	45
Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks	46

Sissejuhatus

Linnad võtavad enda alla 2% kogu planeedi pindalast (Satterthwaite, 2008), kuid nende mõju ulatub üle kogu biosfääri. Kui praegu elab linnades ligikaudu 50% rahvastikust, siis 2030. aastaks prognoositakse linnas elavate inimeste osakaalu kasvu 60%-le (Elmqvist *et al.*, 2013). Suurem inimeste arv linnades sunnib juurde looma elu- ja töökohti, mis vähendab looduslike pindade arvu linnas. Tehislik keskkond muudab loodusele omaseid energiavooge ja loob ebasobilikud tingimused taimede ja loomade eluks. Olles valinud ehituseks jäigad materjalid, mis ei absorbeeri vihmavett nagu looduslik pinnas, on paljud linnad hädas üleujutustega suurvihmade ajal. Samuti on tihe liiklus ja vähesed rohealad linnades põhjustanud kõrge CO₂ kontsentratsiooni. Haljaskatuste arvukad positiivsed omadused nagu vihmavee absorbeerimine, kuuma saare efekti ja majade energiakulu vähendamine ning taimkatte võime siduda CO₂ oma biomassi pakuvad leevendust korraga mitmele probleemile. Kuna katused katavad ligi 20–25% linnade pinnast (Besir & Cuce, 2018), on tegu väga potentsiaalse leevendusmeetmega linnakeskkonna parandamiseks.

Käesoleva töö eesmärk on hinnata, kuidas sammal mõjutab kolme erineva kukeharja liigi võimet siduda CO₂ ning selgitada välja, milline kukeharja liik seob CO₂ kõige paremini. Samuti on eesmärk leida seoseid tulemuste ja meteoroloogiliste näitajate vahel.

Püstitati kolm hüpoteesi:

- Sarmalkate suurendab haljaskatuse võimet siduda CO₂ võrreldes üksiktaimedega;
- Kõige paremini seob CO₂ kolmest erinevast kukeharjaliigist kamtsatka kukehari;
- Suurem veesisaldus mullas aitab kaasa CO₂ sidumisele.

Töö koosneb neljast osast. Esimeses osas antakse ülevaade haljaskatuste rollist ja seni tehtud uuringutest. Teises ja kolmandas osas tutvustatakse hüpoteesi kontrollimiseks kasutatud süsihappegaasi mõõtmise meetodikat ja tulemusi. Neljandas osas analüüsitakse saadud tulemuste põhjuseid ja leitakse võrdluseid eelnevate töödega.

Töö koostamisel otsiti materjali peamiselt teadusartiklitest ja varasematest uurimistöödest.

1. Teoreetiline osa

1.1. Haljaskatuste mõiste ja liigitus ning kasulikud omadused

Haljaskatuste (*green roofs*) all peetakse silmas katuselahendust, mis võimaldab taimestiku arenemist ja kasvamist (Teemusk & Mander, 2009; Whittinghill, 2012). Eesti keeles kasutatakse paralleelselt ka terminit “murukatus”, mida sobiks kasutada pigem heintaimedega katusehaljastuse kohta (Teemusk & Mander, 2009).

Sageli jaotatakse haljaskatused kahte põhiklassi (Berndtsson, 2010; Heusinger & Weber, 2017a; Wong *et al.*, 2003):

1. **Intensiivsete haljaskatuste** substraadikiht on 220–1200 mm ning nad lisavad katusele koormust 160–1000 kg/m² (Teemusk & Mander, 2009). Katused sarnanevad maapealsete parkide ja rohealadega, mis on mõeldud ka inimestele kasutamiseks. Paksem substraadikiht võimaldab kasvada suurematel taimedel ja põõsastel (Berndtsson, 2010), mis nõuavad ka kastmist (Heusinger & Weber, 2017a). Katuse väetamine sõltub substraadikoostisest ja taimestiku koosseisust. Katuse veekindlat kihti ja drenaažikihti tuleks kaks korda aastas üle vaadata ja vajadusel puhastada (Porsche & Köhler, 2003).
2. **Ekstensiivse murukatuse** substraadikiht on 70–160 mm paks, kaasnev lisaraskus jääb vahemikku 50–150 kg/m² (Teemusk & Mander, 2009). Ekstensiivsed katused nõuavad vähest hoolt. Katust peaks üle vaatama 1–2 korda aasta jooksul (Wong *et al.*, 2003). Ekstensiivsete katuste puhul tuleks vältida väetiste kasutamist (Porsche & Köhler, 2003). Katused ei ole mõeldud sagedaseks kasutamiseks. Taimkatte moodustavad tavaliselt vähenõudlikud kukeharjad, lisaks neile kasvavad katustel erinevad rohttaimed ja samblad (Heusinger & Weber, 2017a). Madalamate kulude tõttu on üle 90% haljaskatustest Saksamaal just ekstensiivsed (Heusinger & Weber, 2017b).

Haljaskatuste rajamiseks on vaja järgnevaid kihte:

1. **Kaitsekiht** katuse konstruktsioonil sisaldab vettpidavat membraani ja juuretõket, selleks kasutatakse PVC-d (polüvinüülkloriidi). Juuretõke on vajalik katuse konstruktsiooni kaitseks orgaanilise materjali eest, mis võib põhjustada katuse mädanemist;
2. **Drenaažikiht** on mügarate ja sopistustega kiht, mis on vajalik üleliigse vee ärajuhtimiseks ja piisava niiskustaseme säilitamiseks;

3. **Filterkiht** eraldab substraadikihti drenaažikihist ja hoiab ära viimase ummistumise taimkattest pärit osakestega, selleks kasutatakse sageli geotekstiile, millest vesi suudab läbi tungida, kuid orgaaniline materjal mitte;
4. **Substraadikiht** koosneb mineraalaineid sisaldavast kasvusegust, luues taimede kasvuks sobiva keskkonna. Eestis kasutatakse peamiselt purustatud kergkruusa ja vähese hulga mulla segu;
5. Kõige pealmise kihi – **taimkattekihi** – moodustavad katusel valitsevates tingimustes vastu pidavad taimeliigid. Tänapäeval luuakse taimestik peamiselt ettekasvatatud matte kasutades, kuid võib ka istutada või külvata.

Kuigi nii ekstensiivse kui intensiivse haljaskatuse rajamine on traditsioonilisest katusest kallim, jõuti 2003. a Singapuri teadlaste poolt tehtud uuringus järeldusele, et elutsükli kulud on intensiivse katuse puhul madalamad võrdluses tavalise katusega. Uuringu kalkultatsioonide järgi aitab intensiivne murukatuse saavutada 14,6% languse maja energiakuludes (Wong *et al.*, 2003).

Lisaks majanduslikule aspektile kaasnevad haljaskatuste rajamisega veel mitmed positiivsed mõjud:

- **Tänavatele voolava vihmavee vähendamine ja puhastamine** – kui tavapäraselt katuselt voolab vihmavesi kohe alla, siis murukatuse absorbeerib osa vihmaveest ja lükkab äravoolu tänavatele 45 minuti kuni tunni võrra hilisemaks (Oberndorfer *et al.*, 2007). Osa kinni hoitud vihmaveest voolab hiljem tänavale, kuid teine osa kasutatakse taimede poolt või aurustub evapotranspiratsioonil (Berndtsson, 2010). Saksamaal 2003. a tehtud uuringu järgi voolas 10 cm substraadikihi murukatusest peale 40 mm vihmaseadu tänavale ainult 15 mm vett (Oberndorfer *et al.*, 2007). Jaapani intensiivsel ja Rootsi ekstensiivsel haljaskatusel läbi viidud uuringud näitasid 2009. aastal, et mõlemad katused suudavad siduda $\text{NO}_3\text{-N}$ ja $\text{NH}_4\text{-N}$. Intensiivne katus käitus ka kogulämmastiku (Tot-N) sidujana, kuna rikkalikum taimkate vajab rohkem toitaineid. Samuti suudavad intensiivsed haljaskatused vähendada Fe, Pb ja Zn kontsentratsioone vihmavees (Berndtsson *et al.*, 2009);
- **Kuuma saare efekti vähendamine** – kui asfalt ja betoon kiirgavad tagasi infrapunast soojuskiirgust, siis haljaskatused hoiavad osa vihmaveest taimkattes ning hiljem vee aurustudes jahutavad õhku. Turbulentse õhuvoo ehk *eddy covariance* meetodiga on uuritud ka haljaskatuste energiatasakaalu. Bowen'i suhe (β) näitab tajutava soojusvoo (Q_H) ja latentse soojuse (Q_E) vahekorda. Kui kuivadel perioodidel

võib β olla 3, siis märjematel aegadel 0,3, mis viitab haljaskatuse niisutamise tähtsusele kuival ajal. Öine negatiivne Q_H ja positiivne Q_E tingivad negatiivse Bowen'i suhte (Heusinger & Weber, 2017b). See tähendab, et ülekaalus on evapotranspiratsioon ja õhk jahtub, mis on oluline kuuma saare efekti vähendamiseks linnades;

- **Majade energiakulu vähendamine** – paksem substraadikiht tagab parema soojustuse, mis vähendab nii kütmise kui jahutamise vajadust majas (Sailor, 2008). Haljaskatuste taimkate kaitseb katusekonstruktsiooni äärmuslike temperatuuri kõikumiste eest. Nii on talvel katuse temperatuur võrreldes tavapärase katusega kõrgem ja suvel madalam;
- **Müra vähendamine** – traditsioonilised katused peegeldavad kogu müra, kuid haljaskatustel on võime müra absorbeerida. 20 cm substraadikiht suurendab müra absorbeerumist kuni 46 dB (Porsche & Köhler, 2003). Eriti kasulik on see omadus linnades, lennujaamade läheduses, aktiivse kaevandustegevusega aladel ja mujal mürarikastes kohtades;
- **Looduslike elupaikade pakkumine taimedele ja elusolenditele** – haljaskatused suurendavad floora ja fauna liigirikkust linnakeskkonnas. Zürichi ekstensiivsetel haljaskatustel identifitseeriti kokku 21 240 lülijalgset 321 liigist. Õislillede arvukus suurendas mesilaste liigirikkust, taimede üldise liigirohkusega kasvas ämblike ja mardikate arv. Samas uuringus tõestati, et kui liigirikkus on maapinnal olevatel rohealadel suurem kui haljaskatustel, siis funktsionaalne mitmekesisus ei erine kahes elupaigas (Braaker *et al.*, 2017). Varasemas Šveitsi haljaskatuste mardikaliste liigirikkuse uuringus identifitseeriti 91 erinevat mardikaliste liiki, levinuimad olid kserofiilsed ja eurütoopsed liigid (Pétremand *et al.*, 2018);
- **Katusekonstruktsiooni kestvuse pikendamine** – traditsioonilistele katustele on omased kõrged temperatuurikõikumised, mis kahjustavad katust. Roheliste katuste taimkate aga kaitseb katusekonstruktsiooni otsese päikese kiirguse ja tugevate temperatuurimuutuste eest, tagades katuse pikema kestvuse (Oberndorfer *et al.*, 2007).

Tähelepanuta ei saa jätta ka **esteetilist** aspekti (Berndtsson, 2010; Wong *et al.*, 2003) – murukatused kaunistavad linnakeskkonda, intensiivsed murukatused pakuvad linnas looduslähedast keskkonda, kus lõõgastuda ja aega veeta.

1.2. Taimed

Taimkatte valikul tuleb silmas pidada ekstreemseid tingimusi, mille mõjuväljas taimed kasvama peavad. Katused on avatud tugevatele tuultele, mis võib mõjuda taimedele hävituslikult. Muldkate on katustel õhuke, soodustades tuuleerosiooni ja substraadi kuivamist. Taimed on kaitsetud tugeva päikesekiirguse eest, mis väljendub kõrgemas evapotranspiratsioonis ja lehtede kahjustumises.

Hästi sobivad katustele kasvama madala juurestikuga ja vähese veenõudlikkusega taimed, kes suudavad toime tulla sagedaste kuivaperioodidega. Samal ajal peavad taimed olema suutelised vastu pidama tugevatele vihmasadudele ja suurele transpiratsioonile. Sellised taimed on näiteks paksuleheliste sugukonda kuuluvad kukeharjad (Zhang *et al.*, 2018). Ekstensiivsetel katustel kasvavad sageli mitme- või üheaastased rohttaimed (Getter *et al.*, 2009). Paksem substraadikiht võimaldab kasvada rikkalikumal taimkattel. Nii võivad lisaks paksulehelistele kasvada katustel mitmeaastased rohttaimed, aastased ja kaheaastased taimed ning väiksemad põõsad ja puud. Rikkalikum taimestik tagab tõhusama õhu puhastuse, toitainete ja vee tasakaalu haljaskatusel (Zhang *et al.*, 2018).

1.3. Protsesside kirjeldus ja maailmas läbiviidud uuringud

1.3.1. CO₂ vood linnakeskkonnas

Alates industrialiseerimisest on inimtekkeliste kasvuhoonegaaside hulk atmosfääris märgatavalt tõusnud, seda eeskätt majandusliku surve ja populatsiooni kasvu mõjul (OECD, 2008). Euroopas elab 73% populatsioonist linnades, 2050. aastaks ennustatakse kasvu kuni 80%-ni (United Nations & Department of Economic and Social Affairs, 2014). CO₂ emissioon linnades kasvab koos linnastumise ja rahvaarvu kasvuga. Hinnanguliselt moodustab linnadest pärit CO₂ 70% kogu maakera emissioonidest (International Energy Agency, 2012). Üldiselt võib öelda, et saasteainete kontsentratsioonid linnades on mõjutatud aastaegadest, tuulesuunast (Helfter *et al.*, 2016) ja erinevat liiki kütuste kasutamisest (Sari & Bayram, 2014). Peamised CO₂ allikad nagu liiklus, tööstus ja kodused majapidamised on seotud fossiilsete kütuste põletamisega (Nordbo *et al.*, 2012). Saasteainete kontsentratsioonid on talvel kõrgemad kui suvel (Helfter *et al.*, 2016; Sari & Bayram, 2014). Üldjuhul on saastegaaside emissioonid nädalavahetusesti alati madalamad, mis näitab otsest seost liiklustihedusega. Tänapäeval otsitakse võimalusi nii CO₂ emissioonide vähendamiseks kui ka olemasoleva süsihappegaasi sidumiseks.

Londonis läbi viidud kolmeaastaste mõõtmiste tulemusena saadi CO₂ emissiooniks $39,1 \pm 2,4 \text{ kt km}^{-2} \text{ a}^{-1}$. Süsihappegaasi emissiooni ja välistemperatuuri vahel leiti uuringus negatiivne korrelatsioon, mille põhjus võib olla talvine kõrge maagaasi kasutamine kütmisel. Suvised madalamad kontsentratsioonid olid põhjendatud aktiivsema fotosünteesiga. CO₂ voogudes joonistus välja selge ööpäevane käik, mis oli korrelatsioonis liiklustihedusega. Päevane miinimum esines kolme ajal öösel ning hakkas alates viiest-kuuest tõusma. Emissiooni maksimum saavutati keskpäeval, millele järgnes kerge langus. Öhtune maksimum kujunes kella 18-19 ajal (Helfter *et al.*, 2016).

Lisaks CO₂ voogudele uuriti CO emissioone, mis olid samuti negatiivses korrelatsioonis temperatuuriga. CO üheks allikaks olid autod, eriti kui neile tehti talvel külmkäivitus. Talvised emissioonid moodustasid 45% aastastest emissioonidest. Londoni uuringus leiti positiivne korrelatsioon rahvastiku tiheduse ja CO₂ ning ka CH₄ emissioonide vahel (Helfter *et al.*, 2016).

Itaalia teadlased kasutasid *eddy covariance* meetodit, et mõõta CH₄ ja CO₂ gaasivooge pikema aja jooksul, mis annab parema võimaluse analüüsida hooajalisi muutusi. Itaalia linnas Firenze moodustavad kütmine ja liiklus 99% CO₂ allikatest. Kui kütmisest pärit CO₂ vood on maksimaalsed talvisel ajal, siis liikluses on emissioon aastaringselt konstantne. CH₄ emissioonides ei olnud hooajalisi kõikumisi (Gioli *et al.*, 2012).

On riike, kus köetakse kivisöega, mille kasutamine suurendab märkimisväärselt PM₁₀ ja SO₂ kontsentratsiooni õhus. Türgis on õhusaaste põhjustatud madalakvaliteetse söe kasutamisest kütmiseks talvisel ajal. 74% majapidamistest kasutavad kütmiseks keskmiselt 1 t sütt aastas, mis põhjustab $9,7 \text{ kt SO}_2 \text{ a}^{-1}$, $1,2 \text{ kt a}^{-1} \text{ NO}_2$ ja $46,7 \text{ kt a}^{-1} \text{ CO}$ paiskamist õhku. Võrreldes aastaga 2000 on emissioonid, eriti SO₂ ja PM₁₀, vähenenud, kuna kivisöe kasutamine on langustrendis ja söe kvaliteet on paranenud (Sari & Bayram, 2014).

Rohealased kastetakse ja väetatakse eesmärgiga suurendada produktiivsust ja süsiniku sidumist, kuid samal ajal läheb hooldustöödeks vaja energiat ja tööde käigus emiteeritakse CO₂ (Lal, 2004), lisaks sisaldavad väetised lämmastikku ja fosforit. USA-s, Californias mõõdeti muruga kaetud nelja ala orgaanilise süsiniku sidumist ja N₂O emissioone, et hinnata alade globaalse soojenemise potentsiaali (*global warming potential*, GWP). N₂O voogude mediaaniks saadi $2,0 \text{ ng N m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, esile kerkis selge mõju väetamisest, peale mida oli kaheksa päeva keskmine $25,8 \text{ ng N m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Peale väetamist taastus esialgne voogude tase kaheksa päeva jooksul. Samas uuringus hinnati aastaseid CO₂ vooge, mis olid pärit

pargialade hooldustöödest ning tulemuseks saadi $1469 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ a}^{-1}$. Arvesse võeti kütuse tarbimist, kastmist ja väetiste tootmist (Townsend-Small & Czimczik, 2010).

Rohealad linnades seovad süsinikku fotosünteesil ja salvestavad seda biomassi (Nowak & Crane, 2002), vähendades CO_2 kontsentratsiooni linnades (Nordbo *et al.*, 2012). Lisaks süsinikku siduvatele omadustele mõjutavad suuremad taimed emissioone ka kaudselt. Suuremad puud majade lähedal blokeerivad tuult ja heidavad hoonetele varju, mis väljendub majade madalamates energiakuludes (Strohbach *et al.*, 2012).

Rohealadel on suur potentsiaal käituda süsinikusidujatena linnades. USA-s läbi viidud uuringu järgi võivad puud süsinikku siduda 50 osariigi linnades 25,6 miljonit tonni aastas (Nowak *et al.*, 2013). 35 Hiina suurlinna rohealad kogupindalaga 875 904 ha, mis moodustavad 6,38% nende linnade pindalast, olid võimelised siduma umbes 1,9 miljonit tonni aastas, moodustades 1,3% kogu süsinikusidumisest taimede poolt Hiinas. Nende linnade rohealad on üheskoos võimelised siduma seega 0,33% fossiilsete kütuste põletamisest emiteeritud CO_2 -st (Chen, 2015).

Jaapani uuringus (2010) võrreldi kahe parasvöötme lehtmetsa, millest üks asus linna- ning teine maapiirkonnas, võimet siduda CO_2 . Mõlema metsa CO_2 aastabilanss oli negatiivne, kuid maapiirkonna metsa ökosüsteemi süsinikubilanss (*net ecosystem exchange*, NEE) ($-5,43 \text{ t C ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$) oli 36% suurem linnakeskkonna metsa omast. See on põhjustatud kõrgemast õhutemperatuurist linnades, mis toob kaasa kõrgema ökosüsteemi hingamise. Suvisel ajal, mil fotosüntees oli aktiivseim, suutis linnalik mets ($-11,38 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) päeval perioodil siduda sama fotosünteesiliselt aktiivse kiirguse (*photosynthetically active radiation*, PAR) väärtuse korral rohkem CO_2 kui maapiirkonna mets ($-9,14 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). Öösel oli linnalik mets suurem CO_2 emiteerija ($5,25 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) kui maapiirkonna mets ($3,48 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). Talvel käitusid mõlemad metsad emiteerijatena. Ökosüsteemi hingamise (*ecosystem respiration*, ER) võrdluses leiti, et ER väärtus oli madalam talvel. Kogu aasta jooksul olid väärtused märgatavalt suuremad linnakeskkonna metsas ($13,44 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ p}^{-1}$) kui maapiirkonna metsas ($7,04 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ p}^{-1}$) (Awal *et al.*, 2010). Sidumise efektiivsus oleneb kasvuperioodi pikkusest, rohealade pindalast, samuti liikide koosseisust ja kasvutihedusest ning kliimafaktoritest (Chen, 2015).

1.3.2. CO₂ mõõtmised haljaskatustelt

Haljaskatustel läbi viidud NEE mõõtmised aitavad hinnata katuste potentsiaali CO₂ sidumisel. Selleks kasutatakse sageli *eddy covariance* meetodit, mida lisaks haljaskatustele rakendatakse ka mõõtmistel metsades, märgaladel ja rohumaadel. Sarnaselt rohealadele on haljaskatuste süsiniku aastabilanss negatiivne, kuid kuivematel perioodidel võivad nad olla süsiniku emiteerijad (Heusinger & Weber, 2017a).

Kogu aasta kestnud mõõtmised Berliini haljaskatusel substraadikihi 9 cm näitasid, et CO₂ vood olid enamasti negatiivsed ($-0,22 \mu\text{mol s}^{-1} \text{m}^{-2}$). Kogu aastal sidus ekstensiivne katus $85 \text{ g C m}^{-2} \text{a}^{-1}$. Positiivsed vood esinesid fotosünteesi lakkamisel hiliskevadel ja talvel, juba veebruarikuu lõunatel esines negatiivseid vooge. Märts oli esimene kuu, mil fotosünteesi aktiivsus ületas taimede hingamise. Kõige kõrgem sidumine esines mais, maksimaalselt $-9 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{p}^{-1}$. Juuni lõpust kuni juuli alguseni esines langus CO₂ sidumises vähestest sademetest tuleneva taimede kuivamise tõttu. Peale taimestiku taastumist püsisid augusti lõpuni CO₂ vood katusel taaskord negatiivsed. Kuivade perioodide analüüsimine näitas, et langev CO₂ sidumine on korrelatsioonis langeva veesisaldusega mullas. Kui mulla mahuline veesisaldus langes alla $0,05 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$, siis CO₂ sidumise sõltuvus kiirgusest kaob ning sidumist mõjutab ainult mulla veesisaldus. CO₂ efektiivsemaks sidumiseks on vajalik hoida mulla veesisaldus suurem kui $0,05 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$ (Heusinger & Weber, 2017a).

USA-s viidi läbi kaks uuringut kestvusega kaks aastat, milles koguti andmeid kokku 13 ekstensiivselt haljaskatuselt. Uurimuse eesmärk oli hinnata süsiniku sidumise võimet ning erinevate taimeliikide mõju sellele. Michigani ja Marylandi osariikides asuvate 12 katuse keskmiseks maapealse biomassi süsiniku sisalduseks mõõtmisperioodi lõpuks saadi 162 g C m^{-2} , süsiniku sisalduse hindamiseks kuivatati biomass ahjus ning hiljem korrutati kuivmass kogu süsiniku kontsentratsiooniga. Autorid pakkusid välja, et süsiniku sidumist võivad mõjutada katuse vanus ja substraadikihi paksus. Teises uuringus Michigani osariigi katusel uuriti nelja kukehari taimeperekonda kuuluva taime sidumisvõimet. Sarnaselt eelmisele uuringule sidusid taimed oma maapealsesse biomassi keskmiselt 168 g C m^{-2} . Kõige rohkem süsinikku sisaldasid *Sedum album* (valge kukehari) ja *S. kamtschaticum* (kamtsatka kukehari). Kui *S. acre* süsiniku sisaldus oli esimesel aastal teiste taimedega sarnane, siis teise aasta lõpuks oli temas kõige vähem süsinikku, mis võis tulla ebapiisavast niisutusest, mida taim vajab. Uuringus analüüsiti eraldi maapealse biomassi, juure biomassi ja substraadi süsiniku sisaldust, mille protsentuaalsed sisaldused olid vastavalt 42,1%, 41,4% ja 4,6%. Kõige rohkem sisaldas juurestikus süsinikku kamtsatka kukehari (Getter *et al.*, 2009).

Keller kaasas 2016. aastal uuringusse 14 haljaskatust üle Eesti ja kasutas võrdlusalana looduslikul paepealsel mullal asuvat Naage loopealset. Kasvuhoonegaaside vooge mõõdeti staatilise suletud kambri meetodil. Süsinikubilansi hindamiseks kasutati dünaamilist suletud kambri meetodit nagu ka käesolevas töös. Mõõtmistulemustest lähtudes arvutati ökosüsteemi primaarproduksioon (*net primary production*, NPP). Töös leiti tugev korrelatsioon substraadikihi niiskussisalduse ja CO₂ voogude vahel. Suvel, kui katused olid kuivad, tõusis CO₂ emissioon peale substraadi niiskusesisalduse tõusu. See on tingitud mikrobioloogilise aktiivsuse tõusust niiskuse sisalduse suurenedes. CO₂ voog ja õhutemperatuur olid omavahel seotud, millest autor järeldas, et haljaskatuste puhul on kõige mikrobioloogiliselt aktiivsem kiht pinnalähedane, olles seega mõjutatud õhutemperatuuri kõikumisest. Uurimistöös esinesid maksimaalsed CO₂ vood juunist augustini, mil õhutemperatuur oli kõrge ja niiskusesisaldus võrreldes maikuuga tõusnud. Erinevate katsetüüpide võrdluses leiti, et suurimad CO₂ emiteerijad olid mullapõhise substraadiga haljaskatused, mis võib olla tingitud ühtlasema niiskus- ja temperatuurirežiimiga substraadikihi poolt tagatud stabiilsemast mikrobioloogilisest aktiivsusest. Töös leiti, et võrreldes lamedate katustega, on kaldega katuste CO₂ vood suuremad. Katusekalle välistab vihmasadude ajal liigniiskuse tekke ja tagab parema aereerituse. Mõõdetud metaanivoogude ja CO₂ voogude vahel leiti negatiivne seos. Metaanivoogude analüüsis käitusid enamik katustest metaani oksüdeerijatena. Suurimad CH₄ oksüdeerijad olid mullapõhised haljaskatused, mida autor seletas katusel valitsevate aeroobsete tingimustega ja mikrobioloogiliseks aktiivsuseks sobiva niiskus- ja temperatuurirežiimiga. Dünaamilise kambri mõõtmistulemustest selgus, et enamikel katustest ületas ökosüsteemi hingamine taimede poolt seotud süsihappegaasi hulga (Keller, 2017).

2. Materjal ja metoodika

2.1. Mõõtmisala kirjeldus

Gaasivoogude mõõtmised viidi läbi Jõgeva maakonnas Palamuse vallas Palamuse alevikus, aadressil Kooli tn 4 asuval Palamuse vallamaja ligi 950 m² pindalaga katusel (koordinaatidega 58°41' N, 26°34' E; kõrgus merepinnast 68 m). Tegu on 2010. aastal rajatud matipõhise ekstensiivse haljaskatusega, mille kalle on hinnanguliselt 10°. 30 mm paksusel taimematil kasvavad erinevad kukeharja (*Sedum*) liigid (*S. acre*, *S. album*, *S. kamtschaticum*, *S. spurium*, *S. pulchellum*, *S. rubrotinctum*). Suurt osa katusest katab sinna aastate jooksul ise lisandunud sammal, mille peamised liigid on harilik meelik (*Homalothecium lutescens*), harilik karvkeerik (*Syntrichia ruralis*), harilik punaharjak (*Ceratodon purpureus*), lood-jõhvsammal (*Ditrichum flexicaule*) ja muru-pungsammal (*Bryum caespiticum*). Katusel leidub ka nõmm-liivateed (*Thymus serpyllum*), valget ristikut (*Trifolium repens*), humallutserni (*Medicago lupulina*) ja liiv-koeratubakat (*Crepis tectorum*). Taimemati moodustab kärjesarnane plastikvõrk, mis paikneb geotekstiilil. Geotekstiili all asub drenameerikiht, mis koosneb õhukesest purustatud kergkruusast.



Joonis 1. Uurimistöös kasutatud Palamuse vallamaja haljaskatus.

2.2. Välitööde metoodika

Mõõtmised toimusid kahe nädalaste vahedega 8. juunist kuni 12. oktoobrini 2017 ajavahemikus 11.00-15.00. Plastikust rõngaste (\varnothing 50 cm) paigutamisel jälgiti, et ala hõlmaks erinevaid kukeharja liike nii samblaga kui ilma. Kontrollalaks oli kruusaga kaetud ala. Kokku oli katusel kaheksa rõngast, mis esindasid järgnevaid kooslusi: harilik kukehari, harilik kukehari samblaga, valge kukehari, valge kukehari samblaga, kamtsatka kukehari ja kamtsatka kukehari samblaga, lisaks rõngad vaid sambla ja kruusaga. Antud kolm kukeharja liiki olid peamised üle kogu katuse levinud kukeharja liigid, teisi esines tunduvalt vähem.

CO₂ voogude mõõtmiseks kasutati dünaamilise suletud kambri meetodit. 50 cm kõrgune ja 65-liitrise ruumalaga silindrikujuline pleksiklaasist kamber mõõtis kahe minuti jooksul ökosüsteemi hingamist ja taimede sidumist koos mullahingamisega. Kamber oli varustatud TRP-2 sondiga, mis mõõtis PAR-i ja temperatuuri. Konstantse õhu ringluse kambris tagas ventilaator. Õhu jahutamiseks olid kambris külmakamad. Kambriga mõõdetud gaasivoo intensiivsus arvutati gaasikontsentratsiooni lineaarse muutuse põhjal, kasutades valemit nr 6 Järveoja jt (2016) publikatsioonist. Kambri gaasivoo muutus arvutati 27 mõõdetud väärtuse kohta. Determinatsioonikordaja (R^2) lävendiks oli 0,90 ($p < 0,001$).

Kambrimeetod on mobiilne ja mugav viis, kuidas suhteliselt madalaid emissioone leida. Läbipaistva kambriga tehtud mõõtmised väljendavad ökosüsteemi süsinikubilanssi, mis võimaldab hinnata, kas ökosüsteem käitub CO₂ allikana või sidujana. NEE on kokkuvõtlikult kirjeldatav valemiga $NEE = NPP - R_h$, kus NPP all mõistetakse taimede poolt seotud kogusüsiniku (*gross primary production*, GPP) hulka, millest on maha arvestatud autotroofne hingamine ($NPP = GPP - R_a$). Heterotroofsel hingamisel (R_h) kaotavad süsinikku heterotroofsed organismid nii maapinnal (vähetähtsad) kui eelkõige mullas, lagundades energia saamiseks orgaanilist materjali (Kirschbaum *et al.*, 2001). Töös esindas heterotroofsest hingamisest tulenevaid CO₂ vooge palja aluskruusaga kaetud rõngas. Autotroofne hingamine (R_a) esineb rohelistel taimedel ja osadel bakteriliikidel. Fotosünteesil fikseeritakse süsinik taime biomassi, kuid samal ajal kaotab taim fotorespiratsioonil ehk valgushingamisel süsinikku. Autotroofse hingamise all mõeldaksegi süsiniku kadu taime metabolismi käigus.

Kaetud kambriga tehtud mõõtmised iseloomustavad nii autotroofset kui heterotroofset hingamist, mida kokkuvõtlikult võib nimetada ökosüsteemi hingamiseks. Poolläbipaistva võrguga kaetud mõõtmised näitavad, mil määral on taimed suutelised fotosünteesima pilvise

ilma korral. Arvestades, et läbipaistva kambri teostatav mõõtmine sisaldab nii hingamist kui sidumist, kasutatakse antud töös läbipaistva kambri tulemuste kirjeldamisel lihtsuse mõttes siiski rohkem terminit sidumine.

Mõõtmistulemuste põhjal arvutati GPP alusel välja NPP. GPP leidmiseks kasutati valemit $GPP = NEE - ER$. NPP moodustab GPP-st hinnanguliselt poole (IPCC, 2000), seega NPP leidmiseks jagati GPP tulemus kahega. Käesolevas töös tähistab NPP primaarproduktsooni tootmiseks kasutatavat süsinikku, mida taim võtab õhust. Mida negatiivsem on NPP väärtus, seda enam taim süsinikku õhust seob.

Mõõtmised algasid kambri õhutamisega, et CO₂ kontsentratsioon oleks võrdne ümbritseva õhu CO₂ kontsentratsiooniga. Seejärel asetati kamber kambrikaelale. Gaasivoog mõõdeti kahe minuti jooksul. Sel viisil mõõdeti gaasivoog ühes mõõtmiskohas kolmel erineval tingimusel – läbipaistva, poolläbipaistva ning kaetud kambri. Mõõtmisi korraldati kolm korda. Uurimisperioodi iseloomustavad ilmaandmed päriti Eesti Keskkonnaagentuurist, kasutati Jõgeva ilmajaama andmeid. Vaadeldi järgnevaid parameetreid: õhutemperatuur (kaks nädalat (T_2N), üks nädal (T_7P), 24 tundi (T_1P) enne mõõtmist, mõõtmispäeval (T_MP)), temperatuur mullas mõõtmishetkel (T_M); sademed (kaks nädalat (S_2N), nädal (S_7P), 24 tundi (S_1P) enne mõõtmist); suhteline niiskus nädala jooksul (RN_7P) ja päev (RN_1P) enne mõõtmist; niiskus mullas (N_M), elektrijuhtivus mullas (EJ_M) mõõtmishetkel; päikesekiirguse keskmine ööpäevane summa nädalaperioodil enne mõõtmist (PK_7P); päikesepaiste kestvuse tundide keskmine summa nädalaperioodil enne mõõtmist (PPS_7P). Lisaks arvestati analüüsis mõõtmispäeva paiknemist ajas (*day of year*, DOY).

2.3. Statistiline andmeanalüüs

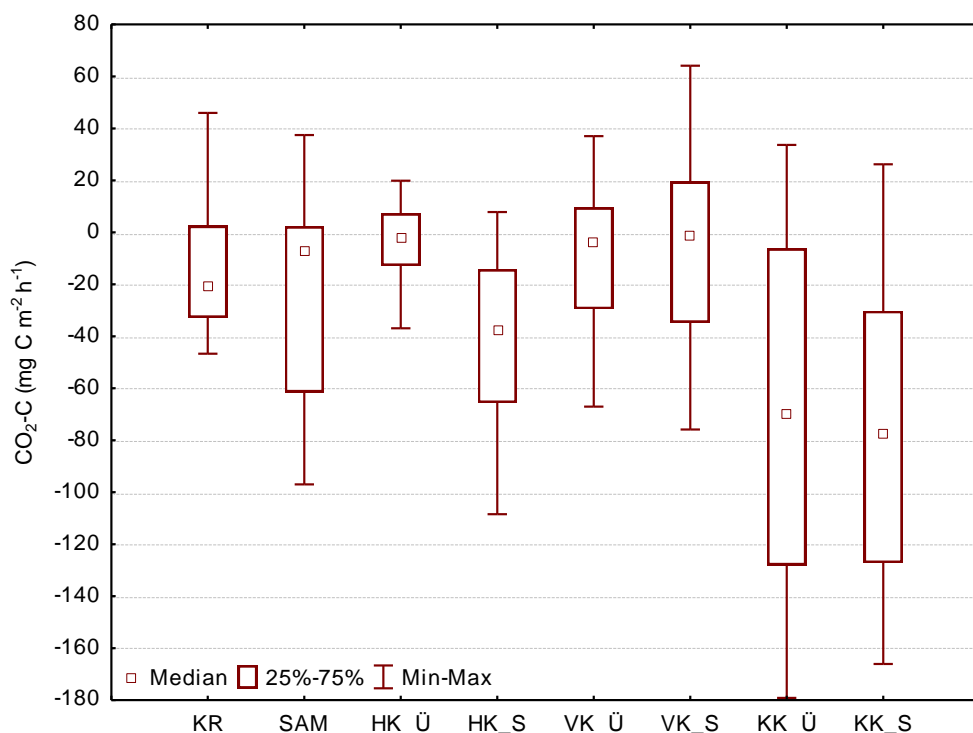
Mõõdetud kasvuhoonegaaside graafiliseks esitluseks kasutati Microsoft Excel 2014 programmi. Süsihappegaasi voogude ja meteoroloogiliste parameetrite vahel korrelatsioonide leidmiseks ja regressioonimudelite loomiseks kasutati programmi STATISTICA 7 (Statsoft Inc.). Sama programmiga leiti korrelatsioonid nii pimekambri kui läbipaistva kambri CO₂ voogude ja arvutatud NPP vahel. Korrelatsioonitabelist leiti olulisemad parameetrid, mida kasutati mudelite loomisel. Ilmastikuparameetrid valiti põhimõttel, et need ei dubleeriks teineteist. Lisaks ilmastikuparameetritele lisati mudelisse muutujateks kõikide taimede ja kruusa protsentuaalsed osakaalud mõõtmisrõngastes.

Rõngastes hinnati erinevat liiki kukeharjade, sambla ning kruusa osakaalu fotode põhjal, mida töödeldi programmis MapInfo versioon 16.0.

3. Tulemused

3.1. Mõõtmiste CO₂ vood

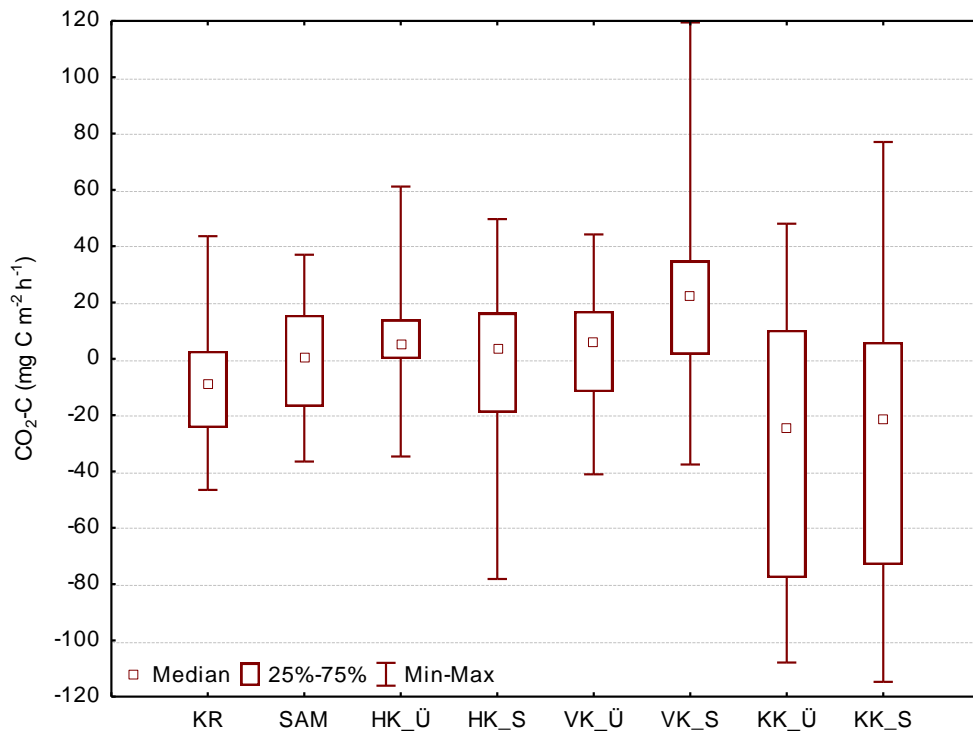
Läbipaistva dünaamilise kambriga mõõdetud NEE tulemuste (Joonis 2) keskmiste väärtuste järgi oli efektiivseim CO₂ siduja kamtsätka kukehari, kes samblaga koos kasvades sidus $-76,02 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ja üksinda $-68,30 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$. Kõige nõrgem siduja oli üksinda kasvav harilik kukehari ($-5,24 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$).



Joonis 2. Läbipaistva kambriga mõõdetud CO₂ voogude tulemused – CO₂ voo mediaan, 25-75% kvartiil ja minimaalsed-maksimaalsed tulemused erinevate taimkattetüüpide puhul. Tähistes: KR – kruus, SAM – sammal, HK – harilik, VK – valge, KK – kamtsätka kukehari vastavalt üksi (Ü) või samblaga (S) rõngas.

Suurim CO₂ voog mediaanväärtuse järgi oli üksinda kasvaval harilikul kukeharjal ($-3,57 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$). Talle järgnes sammal ($-5,30 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$). Kõige väiksem väärtus oli kamtsätka kukeharjal samblaga ($-80,16 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$), kellele järgnes kamtsätka kukehari üksi kasvades ($-72,74 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$). Kõik kolm kukeharja liiki sidusid mediaanväärtuse järgi rohkem samblaga kasvades (Joonis 2). Keskmise CO₂ voo järgi sidus vaid valge kukehari 1,2 mg võrra rohkem üksinda kasvades kui sammal.

Maksimaalsed ühekordsed CO₂ voo väärtused pärinesid 9. juunil samblaga kasvavalt valgelt kukeharjalt ($64,11 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) ja minimaalsed 11. septembril üksinda kasvavalt kamtsätka kukeharjalt ($-179,12 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$).

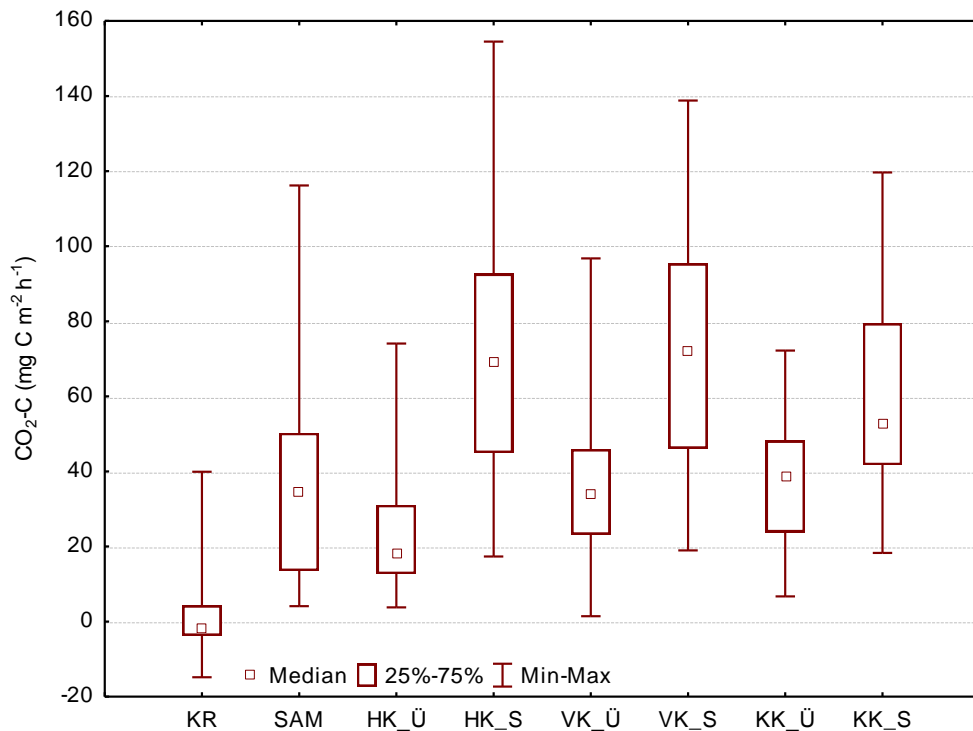


Joonis 3. Poolläbipaistva kambriga mõõdetud NEE tulemused – CO₂ voo mediaan, 25-75% kvartiil ja minimaalsed-maksimaalsed tulemused erinevate taimkattetüüpide puhul. Tähistes toodud Joonise 2 all.

Võrguga kaetud kambri mõõtmised (Joonis 3) iseloomustavad taimede CO₂ sidumise või emiteerimise määra piiratud päikesevalguse tingimustes, näiteks pilves ilma korral. Emiteerijatena käitusid nii samblaga (21,39 mg C m⁻² h⁻¹) kui samblata (3,534 mg C m⁻² h⁻¹) kasvav valge kukehari ja üksinda kasvav harilik kukehari (6,861 mg C m⁻² h⁻¹), teised rõngaste kooslused käitusid sidujatena.

Mediaanväärtusi võrreldes konkureerib suurima sidujana kamtsätka kukehari, kes üksi kasvades seob -40,32 mg C m⁻² h⁻¹ ja samblaga -31,87 mg C m⁻² h⁻¹ (Joonis 3). Suurimad emiteerijad on samblaga kasvav valge kukehari (26,07 mg C m⁻² h⁻¹) ja üksinda kasvav harilik kukehari (8,107 mg C m⁻² h⁻¹).

Ühekordsed maksimaalsed CO₂ vood emiteerusid mõõtmisperioodi alguses 9. juunil samblaga kasvavate valge kukeharja (119,47 mg C m⁻² h⁻¹) ja kamtsätka kukeharja (77,0 mg C m⁻² h⁻¹) kohalt. Minimaalne CO₂ voog pärines samblaga kasvavalt kamtsätka kukeharjalt (-114,76 mg C m⁻² h⁻¹) mõõtmisperioodi lõpus 25. septembril.

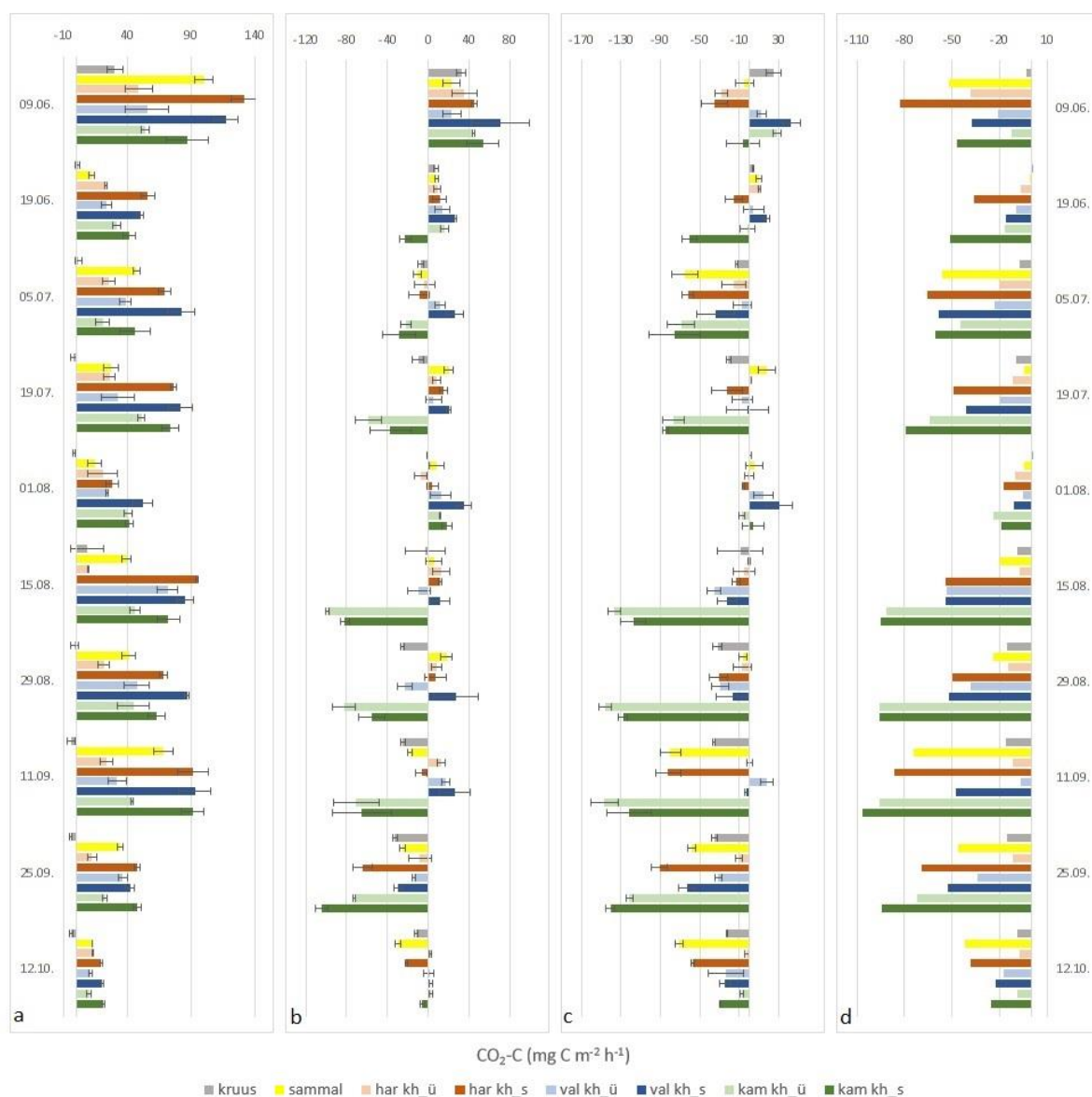


Joonis 4. Kaetud kambriga mõõdetud ER tulemused – CO₂ voo mediaan, 25-75% kvartiil, minimaalsed-maksimaalsed väärtused erinevate taimekattetüüpide puhul. Tähised toodud Joonise 2 all.

Kaetud dünaamilise kambriga saadud tulemused (Joonis 4) kirjeldavad ökosüsteemi hingamist. Keskmised väärtused jäid vahemikku 2,609 mg C m⁻² h⁻¹ (kruus) kuni 71,19 mg C m⁻² h⁻¹ (valge kukehari samblaga). Kõik taimed emiteerisid rohkem samblaga koos kasvades. Ainsana käitus paaril mõõtmiskorral nõrga sidujana kruus.

Suurima mediaanväärtusega olid samblaga kasvavad valge kukehari (81,90 mg C m⁻² h⁻¹) ja harilik kukehari (68,80 mg C m⁻² h⁻¹). Väikseim mediaanväärtus oli kruusal (-1,162 mg C m⁻² h⁻¹) ja samblata kasvaval harilikul kukeharjal (22,72 mg C m⁻² h⁻¹). Kõige suurem erinevus oli samblaga ja samblata kasvava hariliku kukeharja CO₂ voogudes, kus samblaga kasvav taim emiteeris 3 korda rohkem kui samblata (Joonis 4). Valge kukeharja puhul oli erinevus 2,4-kordne ning kamtsatka kukeharjal 1,3-kordne.

Maksimaalsed ühekordsed vood esinesid 9. juunil samblaga kasvaval harilikul kukeharjal (154,49 mg C m⁻² h⁻¹), kellele järgnes valge kukehari samblaga (138,81 mg C m⁻² h⁻¹). Minimaalsed vood pärinesid 15. augusti mõõtmistelt kruusal (-14,83 mg C m⁻² h⁻¹) ja 19. juulil üksinda kasvavalt valgelt kukeharjalt (1,43 mg C m⁻² h⁻¹).



Joonis 5. Kaetud (a), poolläbipaistva (b) ja läbipaistva kambriga (c) mõõdetud CO₂ voogude kolme mõõtmise keskmised tulemused päevade kaupa. Lisaks vastavate mõõtmisrõngaste arvatud NPP väärtused (d). Tähisted: har – harilik, val – valge, kam – kamtsätka kukehari vastavalt üksi (ü) või samblaga (s) rõngas.

Joonisel 5(abc) on kujutatud kokkuvõtlikult CO₂ voogude tulemusi mõõtmispäevade kaupa. Läbipaistva kambriga mõõdetud voogude põhjal (Joonis 5c) olid juunis kõige efektiivsemad CO₂ sidujad harilik kukehari, kes samblaga koos kasvades sidus ligi $-34,7 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ja samblaga kasvav kamtsätka kukehari ($-60,4 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$). Kui samblaga kasvav kamtsätka kukehari käitus mõlemal mõõtmisel sidujana, siis üksiktaim emiteeris kuni $28,9 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, temast rohkem emiteeris juunis vaid samblaga kasvav valge kukehari ($42,9 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$), kes saavutas kogu mõõtmisperioodi maksimaalse emiteerimismäära. Kui esimesel

mõõtmiskorral domineeris taimede CO₂ emiteerimine, siis teistel mõõtmistel taimed valdavalt sidusid CO₂ (Joonis 5c). Juunikuu mõõtmiste temperatuur (Joonis 6) oli võrdlemisi kõrge (ühel korral 17°C, teisel 20,4°C), kuid sademete hulk ööpäev enne mõõtmist oli tunduvalt kõrgem (17 mm) kui tulevastel kordadel. 9. juunil oli võrdlemisi pilvine, kuid 19. kuupäeval oli ilm päikeseline.

Juulis käitusid kõik mõõtmisrõngad, va rõngad hariliku kukeharja üksiktaime ja samblaga, sidujatena. Kui juuli esimesel mõõtmisel olid kõik samblaga kasvavad taimed tugevamad sidujad võrreldes üksikute taimedega, siis teisel mõõtmisel sidus üksik valge kukehari mõnevõrra (5,38 mg C m⁻² h⁻¹ võrra) rohkem kui samblaga kasvav taim. Sarnaselt juunikuule olid juuli silmapaistvaimad sidujad kamtsätka ja harilik kukehari. Juuli esimesel mõõtmisel oli kolmas tugev siduja sammal (–65,1 mg C m⁻² h⁻¹), kes teisel juulimõõtmisel käitus emiteerijana. 5. juulil oli taevast kaetud paksu pilvevaibaga, 19. kuupäeval oli ilm vahelduva pilvisusega, kuid valdavalt päikeseline. Niiskus mullas oli suurem kui juunikuul mõõtmistel.

Augustis olid kõige väiksemad sidumismäärad esimesel mõõtmiskorral, mida iseloomustas pilvine ilm. Esimesel mõõtmiskorral suutsid nõrkade sidujatena käituda vaid samblaga kasvav harilik ja samblata kasvav kamtsätka kukehari. Augustikuu kõige efektiivsem siduja oli üksinda kasvav kamtsätka kukehari (kokku kolmel mõõtmisel –289,9 mg C m⁻² h⁻¹), kellele järgnesid samblaga kasvav kamtsätka kukehari (–241,3 mg C m⁻² h⁻¹) ja üks kasvav valge kukehari (–50,4 mg C m⁻² h⁻¹). Esimesel augustikuu mõõtmisel, kui sidumine oli võrdlemisi nõrk, oli mullaniiskus kõikide mõõtmiskordade kõige madalam (0,08 m³ m⁻³); kui mõõtmised algasid päikeseliselt, siis kolmanda seeria ajal oli lauspilvisus. Teisel mõõtmisel, kui sidumine oli märgatavalt efektiivsem, oli niiskus mullas tõusnud (0,235 m³ m⁻³) ja ilm oli kogu päeva jooksul päikeseline. Kolmanda mõõtmispäeva ilmastikutingimused olid sarnased teisele.

Septembrikuu esimesel mõõtmisel käitusid vaid üks kasvav valge kukehari ja üks kasvav harilik kukehari emiteerijatena, teisel mõõtmisel käitusid kõik taimed sidujatena. Septembris saavutas üks kasvav kamtsätka kukehari kogu mõõtmisperioodi maksimaalse sidumismäära (–147,0 mg C m⁻² h⁻¹). Kui 11. septembri mõõtmisel käitus suurema sidujana üks kasvav kamtsätka kukehari, siis 25. kuupäeval sidus rohkem samblaga kasvav taim. Teised taimed käitusid mõlemal septembrikuu mõõtmisel tunduvalt tugevamate emiteerijatena koos samblaga kasvades. Ilm oli 11. septembril pilves ja sajune, mulla niiskusesisaldus saavutas kogu mõõtmisperioodi maksimumi (0,277 m³ m⁻³). 25. septembril, mil nii samblaga

kasvavad valge ja harilik kukehari saavutasid mõõtmisperioodi sidumise maksimumi, oli ilm päikseline, mulla niiskusesisaldus oli $0,23 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ning õhutemperatuur sel päeval 16°C .

Mõõtmisperioodi viimasel mõõtmisel 12. oktoobril oli sidumismäär märgatavalt kahanenud, kuid ei esinenud emiteerimist. Ilm oli pilves ja sajune. Temperatuur mõõtmispäeval oli kogu perioodi madalaim ($7,2^\circ\text{C}$), niiskuse sisaldus mullas aga kõrgeim ($0,34 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$).

Poolläbipaistva kambriga tehtud mõõtmistel käitusid enamik taimi valdavalt emiteerijatena või nõrkade sidujatena (Joonis 5b). Erandlikult suutis teistest taimedest märgatavalt tõhusamalt CO_2 siduda kamtsatka kukehari, kes üksikuna kasvades käitus emiteerijana vaid juunikuu mõlemal ja augustikuu ühel mõõtmisel, samblaga kasvav taim oli emiteerija ühel mõõtmisel juuni- ja augustikuus. Tema kõrval suutis mitmel korral siduda ka harilik kukehari.

Kaetud kambriga mõõtmistel käitusid kõik taimed CO_2 emiteerijatena (Joonis 5a). Ainukesena käitus sidujana kruus. Kõik taimed emiteerisid samblaga kasvades rohkem kui üksinda. Kogu mõõtmisperioodi jooksul olid kõige suuremad emiteerijad samblaga kasvavad harilik ja valge kukehari.

Juuni esimesel mõõtmisel saavutasid kruus, samblaga kasvavad harilik ja valge kukehari, üksinda kasvavad kamtsatka ja harilik kukehari kogu mõõtmisperioodi suurimad emiteerimismäärad. Esimesel juunikuu mõõtmisel 9. juunil erinesid emissioonivood ligi 4,3-kordselt, maksimaalselt emiteeris harilik kukehari samblaga ($131,3 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) ja minimaalselt kruus ($30,3 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$). Üksinda kasvavate taimede emissioon oli väga sarnane jäädes vahemikku $49,2\text{--}55,5 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$. Samblaga kasvavate taimede emissioonivood erinesid rohkem, jäädes vahemikku $131,3\text{--}87,1 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$. Teisel juunikuu mõõtmisel olid kõikide taimede emissioonivood nõrgenenud ligikaudu kaks korda. Kõige rohkem vähenesid kruusa (22-kordselt) ja sambla (8-kordselt) emissioonid.

Juulikuu mõõtmistel oli esimesel mõõtmisel emiteerimine tugevaim rõngastes, kus kasvasid samblaga koos valge ($82,45 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) ja hariliku kukeharja ($69,31 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) taimed. Teisel mõõtmisel emiteerisid eelnevalt mainitud taimed sarnases koguses süsinikku, kuid märgatavalt oli tõusnud emissioon samblaga kasvava kamtsatka kukeharja poolt, kes esimesel mõõtmisel emiteeris $46,07 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ning teisel $73,92 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$. Samuti oli emissioon üksinda kasvavate hariliku ja valge kukeharja taimedega rõngastes mõlemal mõõtmiskorral sarnane, kuid kamtsatka kukeharja puhul oli erinevus 2,5-kordne.

Augustikuu kahe viimase mõõtmise sammaldega kasvavate taimede emissioonivood olid sarnased juulikuu viimasele mõõtmisele. Augustikuu esimest mõõtmiskorda, mil taimi mõjutas kuiv ja palav ilm, iseloomustas eelmisest mõõtmisest madalamad emissioonimäärad, olles sarnased juunikuu teisele mõõtmisele. Kõige suuremad erinevused 1. ja 15. augusti mõõtmisvoogudes olid samblaga kasvava hariliku kukeharja ja sambla korral. Mõlemal juhul teisel mõõtmiskorral emissioon suurenes vastavalt 3,3 ja 2,8 korda.

Septembrikuu esimese mõõtmise tulemused olid suhteliselt stabiilsed ning järgisid juulikuus ja augusti viimastel kordadel saadud tulemusi, kuid sambla emissioon tõusis $68,69 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$. Septembri teisel mõõtmisel olid peaaegu kõikide rõngaste emissioonivood võrreldes esimese mõõtmisega ligi 2 korda vähenenud, tõusid vaid üksiku valge kukeharja ($4,59 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ võrra) vood.

Oktoobrikuus vähenesid enamus taimede emissioonivood veel ligi 2 korda. Väike tõus oli vaid üksiku hariliku kukeharja voos. Sammaldega kasvavate taimede emissioonid jäid vahemikku $19,75\text{--}21,35 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ja üksiktaimede puhul $10,35\text{--}13,06 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$. Sammal emiteeris $12,8 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, kruus käitus ainukese sidujana ($-3,64 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$).

Arvutatud NPP (Joonis 5d) oli igal mõõtmispäeval kõikide taimekoosluste korral negatiivne, vaid kruusa puhul oli 19. juunil ja 1. augustil tulemus nõrgalt positiivne (vastavalt $1,57$ ja $1,26 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$). Juunis oli NPP kõigi kolme kukeharja liigi korral samblaga kasvades suurem kui samblata. Kõige suurem oli erinevus kamtsatka kukeharja puhul, kelle netoproduksioon samblaga koos kasvades oli ligi 4 korda suurem kui üksi kasvades, hariliku kukeharja korral oli erinevus 2,2- ning valgel kukeharjal 1,7-kordne. Juunikuus oli NPP väärtus suurim samblal ($-52,23 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) ja samblaga kasvaval harilikult kukeharjal ($-83,01 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$). Kõige nõrgem NPP oli kruusal. Kukeharjadest oli kõige väiksem NPP üksi kasvavatel valgel ($-9,35 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) ja kamtsatka kukeharjal ($-12,52 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$). Juunikuu teisel mõõtmisel saavutasid kruus, sammal ja üksi kasvav harilik kukehari kogu mõõtmisperioodi madalaima NPP väärtuse, samas saavutas üksi kasvav harilik kukehari teisel esimesel mõõtmisel maksimaalse NPP.

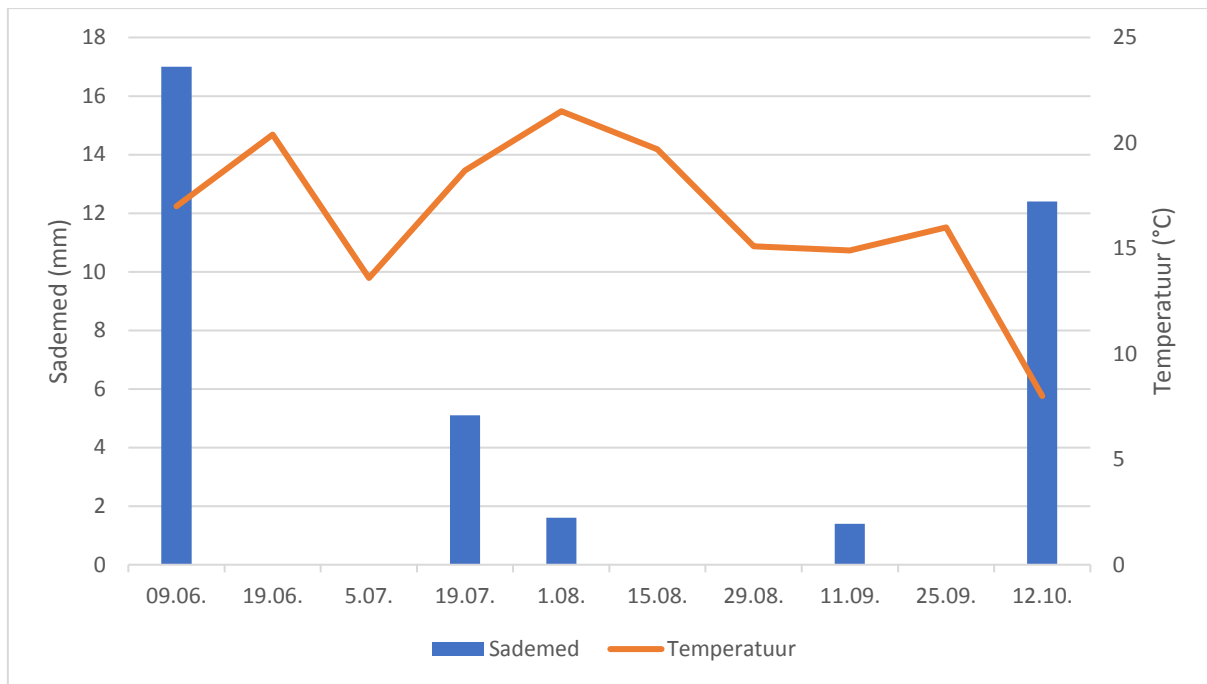
Juulis oli NPP enamikel taimedel võrreldes juuniga kõrgem, vaid hariliku kukeharja puhul NPP mõnevõrra vähenes esimesel juulikuu mõõtmisel. Juunikuu esimesel mõõtmisel saavutas samblaga kasvav valge kukehari kogu mõõtmisperioodi suurima NPP ($-58,27 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$). Kõige suurem NPP oli samblaga kasvavatel kamtsatka ($-79,25 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) ja harilikul kukeharjal ($-65,51 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$).

Augustikuu esimese mõõtmiskorra tulemuste põhjal arvatud NPP väärtus oli kõigi taimede puhul madalam kui juulikuus, kuid ülejäänud kahel augustikuu mõõtmisel oli NPP enamike taimede puhul suurem. Üksi kasvava hariliku kukeharja voogude põhjal arvatud NPP oli aga augustikuu esimesel mõõtmisel suurem kui teisel ning kolmandal korral sarnane esimesega, mis on teistest taimedest selgelt eristuv. Augustikuu esimese mõõtmiskorra mõõtmisvoogude põhjal arvutati kogu mõõtmiskorra madalaimad NPP väärtused samblaga kasvavate hariliku, valge ja kamtsatka kukeharja ning üksi kasvava valge kukeharja taimede korral. Teisel augustikuu mõõtmise põhjal oli NPP kogu mõõtmisperioodi kõige suurem üksi kasvaval valgel kukeharjal ($-53,53 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) ja kolmandal mõõtmisel kruusal ($-15,4 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$). Kõige madalam NPP oli augustikuu viimasel mõõtmisel kamtsatka kukeharjal nii üksi kui koos samblaga kasvades $-95,5 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$.

Septembrikuus oli NPP kukeharjataimede puhul sarnaselt augustikuule kõrge. Sambla NPP oli aga tunduvalt kõrgem eelnevate mõõtmiste NPP-st. Septembrikuu esimesel mõõtmise põhjal arvatud NPP oli nii samblaga kasvavatel harilikul ($-86,58 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) ja kamtsatka ($-106,47 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) ning üksi kasvaval kamtsatka kukeharjal ($-95,53 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) kogu mõõtmisperioodi maksimaalne, ka sambla ($-74,28 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) puhul oli NPP kogu mõõtmisperioodi suurim. Kõige väiksem oli NPP septembrikuus üksi kasvavatel valgel ($-6,85 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) ja harilikul kukeharjal ($-11,34 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$).

Oktoobrikuu mõõtmiste põhjal arvatud NPP oli kõigil taimedel väiksem kui augustikuus. Kõige suurem muutus (11-kordne) võrreldes septembrikuu NPP-ga oli üksi kasvaval kamtsatka kukeharjal. Oktoobrikuu kõige suurem NPP oli samblal ($-42,03 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) ja kõige väiksem üksi kasvaval harilikul kukeharjal ($-7,60 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$). Üksi kasvava kamtsatka kukeharja NPP oli kogu mõõtmisperioodi kõige madalam ($-8,54 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$).

Joonisel 6 on toodud taustainfona mõõtmispäevade lõikes temperatuur ja sademed mõõdetuna Jõgeva ilmajaamas.



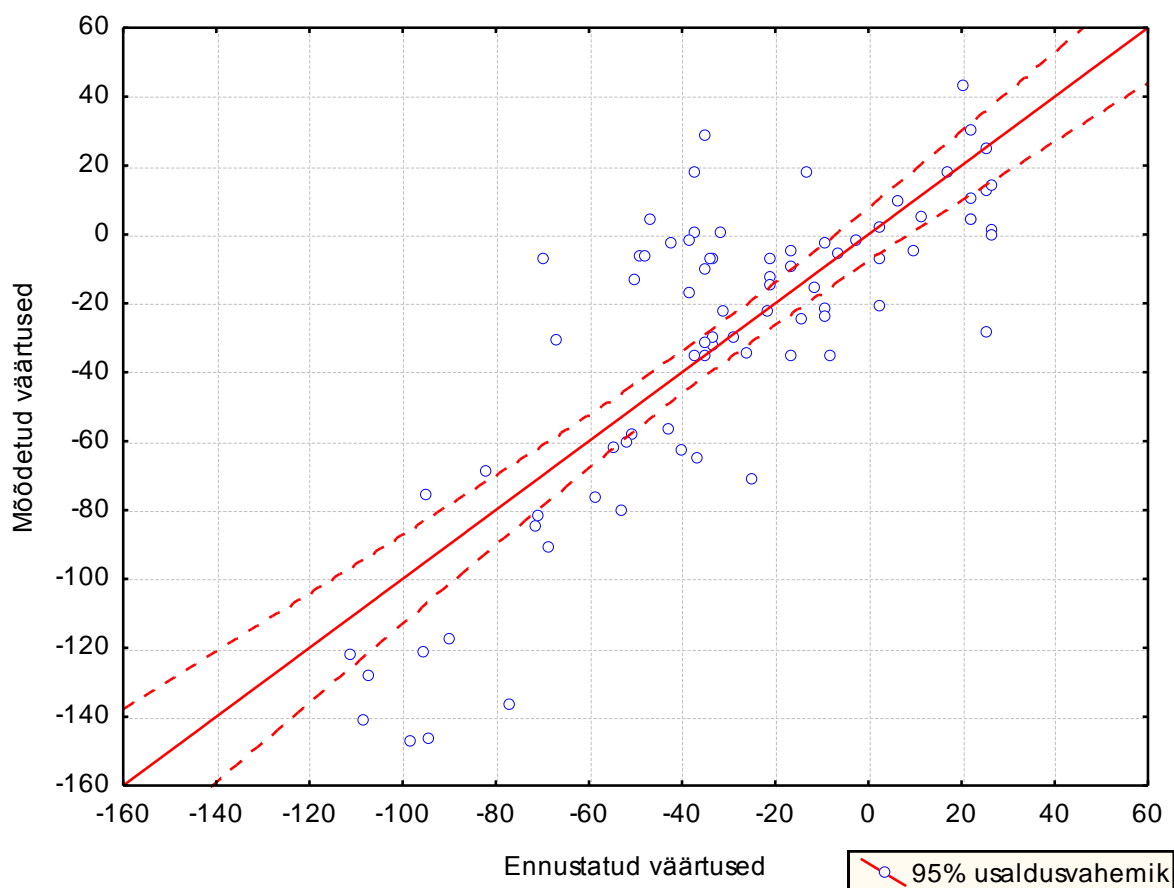
Joonis 6. Temperatuur mõõtmispäeval ja sademete hulk üks päev enne mõõtmist (Eesti Keskkonnaagentuur).

3.2. CO₂ voo ning NPP sõltuvus ilmastikust

Läbipaistva kambri CO₂ vood olid enim ($p < 0,05$) mõjutatud üks päev enne mõõtmispäeva ja mõõtmispäeval mõõdetud temperatuurist, kaks nädalat ja üks päev enne mõõtmispäeva mõõdetud sademete hulgast, suhtelisest õhuniiskusest nädala jooksul enne mõõtmist, niiskusest mullas, mulla elektrijuhtivusest ning päikesekiirguse ööpäevaste summade keskmisest nädala jooksul enne mõõtmist. Tulemuseks saadi regressioonimudel (Joonis 7), mille muutujate arvuga kaalutud determinatsioonikordaja ($R^2_{adjusted}$) on 0,59. Vaadeldud ja mudeli ennustatud väärtused langevad kõige paremini kokku nõrga kuni keskmise sidumise korral. Äärmuslikumate väärtuste korral on kokkulangevus nõrgem.

Võrrand (1):

$$CO_{2(läbipaistev\ kamer)} = 3457,0 - 2,49 \cdot "T_MP" + 2,490 \cdot "S_1P" + 2,581 \cdot "RN_7P" - 304,0 \cdot "N_M" + 1034,0 \cdot "EJ_M" + 5,299 \cdot "PK_7P" - 37,4 \cdot "H_KH_S_%" - 36,5 \cdot "H_KH_Ü_%" - 38,5 \cdot "K_KH_S_%" - 38,4 \cdot "K_KH_Ü_%" - 36,7 \cdot "KR\%" - 36,8 \cdot "S\%" - 36,0 \cdot "V_KH_S_%" - 36,6 \cdot "V_KH_Ü\%"$$

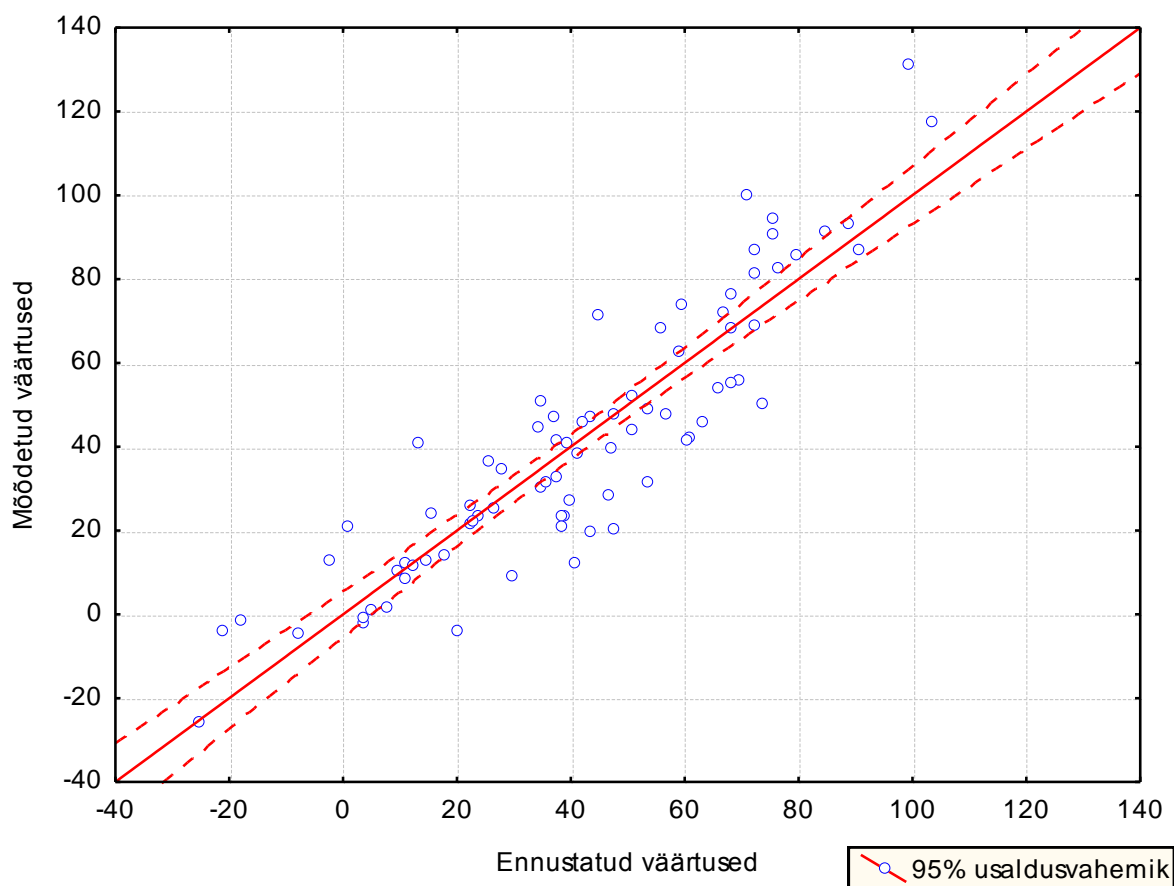


Joonis 7. Regressioonimudel läbipaistva kambri CO₂ voogude seosest meteoroloogiliste näitajatega.

Pimekambri CO₂ vood olid eelkõige mõjutatud suhtelisest õhuniiskusest nädala jooksul enne mõõtmist. Teiste meteoroloogiliste näitajatega olid seosed nõrgemad ($p > 0,05$). Mudeli loomiseks valiti muutujateks veel päev enne mõõtmisi mõõdetud temperatuur, sademete hulk kaks nädalat enne mõõtmisi, niiskus mullas, elektrijuhtivus mullas ja päikesekiirguse ööpäevaste summade keskmine nädala jooksul enne mõõtmist. Saadi mudel (Joonis 8), mille muutujate arvuga kaalutud determinatsioonikordaja ($R^2_{adjusted}$) on 0,78. Saadud kolmest regressioonimudelist on antud mudel kõige kõrgema determinatsioonikordajaga ja kirjeldab väga hästi katusel esinevat ökoloogilist hingamist.

Võrrand (2):

$$\begin{aligned} CO_{2(pimekamber)} = & -153,0 - 1,12 \cdot "T_1P" - 0,659 \cdot "S_2N" - 4,05 \cdot "RN_7P" + 207,4 \cdot "N_M" - \\ & 173,0 \cdot "EJ_M" - 2,38 \cdot "PK_7P" + 6,618 \cdot "H_KH_S\%" + 5,856 \cdot "H_KH_Ü\%" + 6,154 \cdot \\ & "K_KH_S\%" + 6,221 \cdot "K_KH_Ü\%" + 5,190 \cdot "KR\%" + 5,562 \cdot "S\%" + 6,020 \cdot \\ & "V_KH_S\%" + 5,822 \cdot "V_KH_Ü\%" \end{aligned}$$

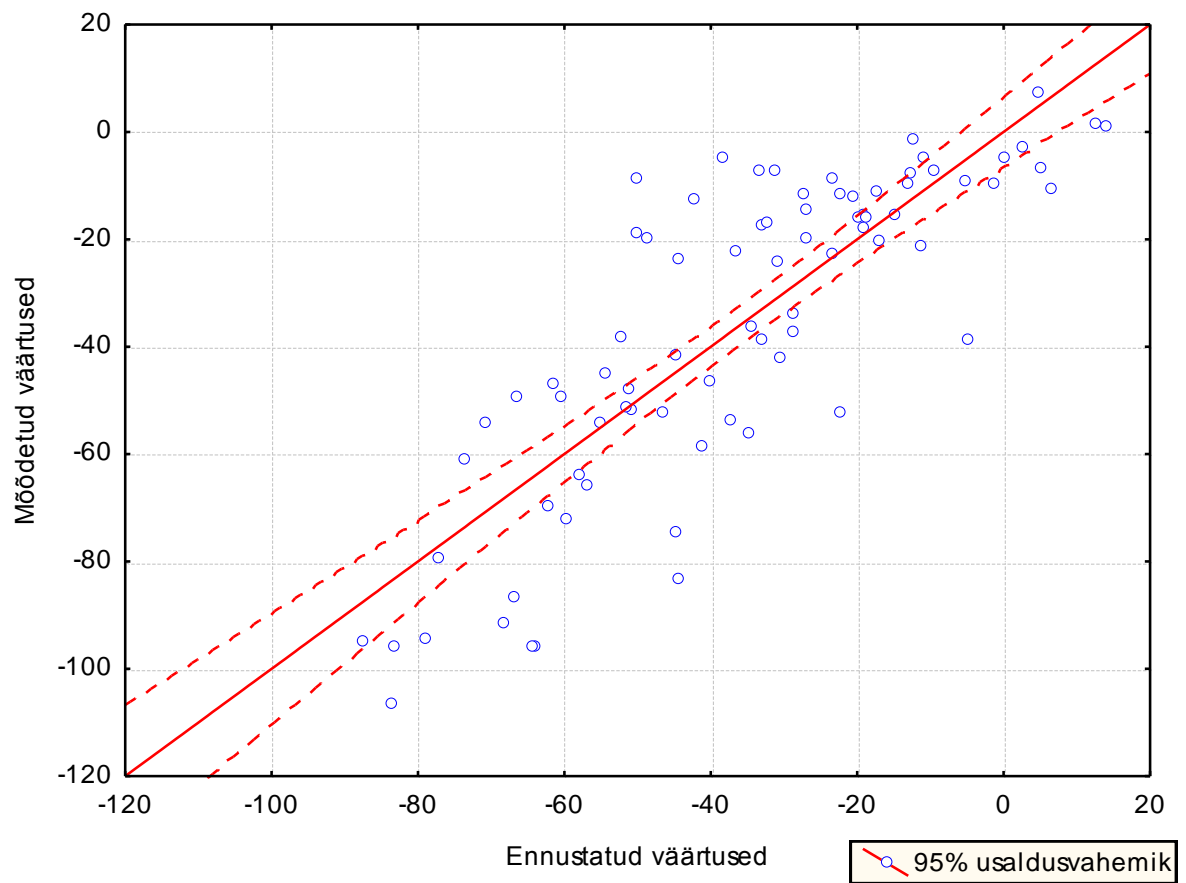


Joonis 8. Regressioonimudel pimekambri CO₂ voogude seosest meteoroloogiliste näitajatega.

Arvutatud NPP sõltus kõige rohkem niiskusest mullas ja elektrijuhtivusest. Mudeli arvutamiseks valiti olulisteks muutujateks veel temperatuur mõõtmispäeval, suhteline õhuniiskus päev enne mõõtmist ja sademete hulk ning päikese kiirguse ööpäevaste summade keskmine nädala jooksul enne mõõtmist. Saadi mudel (Joonis 9), mille muutujate arvuga kaalutud determinatsioonikordaja (R^2 *adjusted*) on 0,63, mis on sarnane NEE vooge kirjeldava regressioonimudeli kordajaga. Ka sel graafikul on mudeli ennustatud ja mõõdetud väärtuste kokkulangevus kõige nõrgem äärmuslike väärtuste korral.

Võrrand (3):

$$\begin{aligned} \text{NPP} = & -19\text{E}2-6,14 \cdot "T_MP" - 0,970 \cdot "S_1P" + 1,700 \cdot "RN_1P" - 193,0 \cdot "N_M" - 493,0 \cdot \\ & "EJ_M" + 3,240 \cdot "PK_7P" + 17,21 \cdot "H_KH_S_%" + 18,09 \cdot "H_KH_Ü_%" + 16,89 \cdot \\ & "K_KH_S_%" + 16,94 \cdot "K_KH_Ü_%" + 18,28 \cdot "KR\%" + 18,04 \cdot "S\%" + 17,61 \cdot \\ & "V_KH_S_%" + 18,01 \cdot "V_KH_Ü\%" \end{aligned}$$



Joonis 9. Regressioonimudel NPP seosest meteoroloogiliste näitajatega.

4. Arutelu

Haljaskatustel kasvavatest taimedest sõltub, kui efektiivselt katus CO_2 õhust seob. Kasvutingimused haljaskatustel on taimede jaoks keerulised, mistõttu suudavad seal ellu jääda vähesed liigid. Kukeharjade efektiivne võime siduda katustel CO_2 on tõestatud juba varasemalt (Getter *et al.*, 2009). Kukeharjad kuuluvad CAM-fotosünteesiga taimede hulka, mis tähendab, et nad avavad õhulõhed öösel, et koguda ja salvestada süsihappegaasi orgaanilise happe kujul oma rakuvakuoolidesse. Päeval ajal on õhulõhed kinni ning fotosünteesiks vajalik CO_2 eraldatakse orgaanilisest hapest.

Käesolevas töös olid vaatluse all kolm kukeharja liiki koos samblaga ja ilma. Kõige edukamalt suutis läbipaistva kambriga tehtud mõõtmistel CO_2 siduda kamtsatka kukehari. Kui teistel kukeharja liikidel oli poolläbipaistva kambriga läbi viidud mõõtmistel CO_2 sidumise efektiivsus märgatavalt madalam, siis kamtsatka suutis ka poolvarjutatud tingimustel CO_2 siduda. See on seotud antud taimeliigi paksulehelise padjandina kasvamise vormi ja hea vee säilitusvõimega. Kõige nõrgemini suutis läbipaistva kambriga mõõtmistel CO_2 siduda kukeharjadest valge kukehari (nii üksi kui samblaga kasvades, keskmiselt $-10 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$), mis võib olla põhjustatud taime madalamast põuatolerantsusest.

Läbipaistva kambriga mõõdetud tulemustes on näha sambla positiivset mõju kukeharja taimede CO_2 sidumise efektiivsusele. Kõik kolm kukeharja liiki sidusid mediaanväärtuse järgi samblaga koos kasvades rohkem CO_2 . Samblaga rõngaste NPP väärtus näitab samuti efektiivsemat sidumist (Joonis 5d). Kõige rohkem parandas sammal CO_2 sidumist hariliku ja kamtsatka kukeharja taimedel. Kui harilik kukeharja NPP oli keskmiselt $-54,83 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, siis üksi kasvades vaid $-13,92 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$. Harilikul kukeharjal on võrreldes teiste kukeharjadega madalam juurestik, mistõttu on tal kõige suurem oht kuivades tingimustes üksi kasvades kärbuda. Samblal on positiivne mõju taimede CO_2 siduvuse parandamiseks, kuna säilitab taimejuurtele sobivamat niiskuse režiimi ja keskkond on soodsam kasvamisele.

Käesolevas töös leiti kogutud andmete põhjal tugevaimad korrelatsioonid CO_2 voogude ja arvutatud NPP ning ilmastikuparameetrite vahel, mille põhjal loodi regressioonimudelid. Mudelite kõrge determinatsioonikordaja põhjal võib väita, et saadud mudelid sobivad hästi läbipaistva ja pimekambriga CO_2 voogude ning NPP kirjeldamiseks haljaskatustel. Leiti, et CO_2 vooge läbipaistvas kambris mõjutab oluliselt mullaniiskus ja seitsme päeva jooksul mõõdetud suhteline õhuniiskus. Niiskus mullas oli uuringuperioodil madalaim 1. augustil, mil esines ka nõrgim CO_2 sidumine taimede poolt läbipaistvas kambris ning arvutatud NPP

oli samuti kõige madalam. Kõige rohkem suutis kuival päeval CO₂ siduda nii samblaga kui samblata kasvav kamtsatka kukehari, mis kinnitab antud taimeliigi paremat veesidumisvõimet võrreldes teiste liikidega. Peale esimest augustit niiskusesisaldus tasapisi suurenes ja taastus ka taimede võime süsihappegaasi siduda. Kuivades tingimustes mullahingamine kasvab, kuna vähenenud veesisaldus võimaldab aeroobse keskkonna sügavamale ulatumist mullakihi, mis suurendab mikrobioloogilist elutegevust ja samal ajal väheneb fotosünteesi aktiivsus, kuna taimed vajavad fotosünteesiks vett. Madal niiskuse sisaldus põhjustab taimede närbumise ja lehepinna indeksi (*leaf area index*, LAI) vähenemise, mistõttu fotosüntees on nõrgem (Heusinger & Weber, 2017a). Nii 1994. aastal Manitoba madalsoos (Schreader *et al.*, 1998) kui 2014–2015. aastal Berliini haljaskatusel (Heusinger & Weber, 2017a) läbiviidud CO₂ voogude mõõtmised jõudsid samale tulemusele, kus CO₂ sidumine oli tugevam päevadel, mil niiskusestress oli madalaim. Madalsoo uuringus leiti, et hingamisest põhjustatud CO₂ emissioon öösel suurenes temperatuuri kõrgenedes ja vähenes temperatuuri vähenedes. Käesolevas uuringus aga oli pimedas kambri CO₂ voogude ja päev varem mõõdetud õhutemperatuuri vahel suhteliselt nõrk positiivne seos ($p=0,09$), mõõtmispäeval mõõdetud temperatuuriga oli seos veelgi nõrgem. Nõrgem seos võib olla tingitud mõõtmiste lühiajalisusest.

Läbipaistva kambri tulemuste tugev seos ($p=0,002$) seitsme päeva jooksul mõõdetud päikesekiirguse intensiivsusega näitab taimede fotosünteesi ja biomassi sõltuvust päikesekiirgusest. Seos leiti ka Berliini haljaskatusel tehtud mõõtmisel (Heusinger & Weber, 2017a). Päikesekiirgus on vajalik taimede kasvuks ja efektiivseks fotosünteesiks, kuid intensiivne päikesekiirgus koos vähese niiskusega mullas põhjustab taimede biomassi kärbumise ja suurendab mullahingamist. Mõõtmisperioodil oli päikesekiirguse tugevus keskmisest madalam ja enamus taimekoosluste CO₂ sidumine kõrgeim mõõtmiste teises pooles alates 15. augustist. Mõõtmisperioodi esimese poole nõrgemat sidumist iseloomustab kõrgem päikesekiirguse intensiivsus ja madal mullaniiskus.

Haljaskatuse tingimustele sarnane ökosüsteem on kõrbeline maastik, kus on intensiivne päikesekiirgus ja madal mullaniiskus. New Mexico kõrbelisel rohumaal läbi viidud uuringus, kus ala käitus valdavalt CO₂ emiteerijana, ilmnis, et päevased CO₂ vood olid kergelt negatiivsed perioodil, mil sademete hulk oli suurim (Mielnick *et al.*, 2005). Ka käesolevas uuringus leiti tugev seos läbipaistva kambri CO₂ voogude ja sademete vahel, mis olid mõõdetud üks päev enne mõõtmisi ja kaks nädalat enne mõõtmisi. Kuna niiskus mullas

on tugevalt seotud sademete hulgaga, on seos igati ootuspärane. Suurem niiskuse sisaldus tagab efektiivsema fotosünteesi taimede poolt.

Süsihappegaasi emissioon mullast sõltub mullaorganismide ja taimejuurte elutegevusest, mille käigus tekib CO₂. Pimekambriga mõõtmisel saadi aga käesolevas töös ka negatiivne CO₂ voo tulemus kruusa rõngal. Selle põhjuseks võib olla karbonaatide teke, mis leiab aset niisketes tingimustes, mis antud uurimuses sügisperioodil ka valdavad olid.

Rohumaad sobivad murukatustega hästi võrdluseks, kuna käituvad üldiselt süsinikusidujatena, kuid kuivematel perioodidel võivad osutada ka emiteerijateks (Novick *et al.*, 2004). Kui rohumaa uuringus 2004. aastal Irimaal leiti, et mulla hingamine on tugevalt mõjutatud mulla niiskusesisaldusest (Byrne *et al.*, 2005), siis käesolevas töös oli seos pimekambriga tulemuste ja mullaniiskuse vahel nõrgem ($p=0,02$). Pimedas kambri CO₂ vood oli kõige rohkem mõjutatud seitsme päeva suhtelisest õhuniiskusest ($p=0,003$), mis näitab üldise niiskustaseme olulisust orgaanika lagunemisel katuse kihistikus.

Pimekambriga ja sademete ega temperatuuri vahel olulist seost ei leitud, kuigi näiteks Tiibeti rohumaal tehtud mõõtmiste analüüsil selgus, et temperatuuri vähenedes ökosüsteemi hingamine samuti nõrgeneb. Samas uuringus leiti, et ökosüsteemi hingamine kasvas sademete hulga kasvuga (Zhao *et al.*, 2018). Erinevused võivad olla tingitud erinevast mullakihi paksusest, mis haljaskatuse puhul on õhukesem kui rohumaal, sellest tulenevalt varieeruvad mikrobioloogiline koosseis ja taimedele loodud elutingimused. Pimekambriga CO₂ voogude allikate tuvastamiseks haljaskatusele tuleks läbi viia põhjalikumaid uuringuid, näiteks eristada autotroofne ja heterotroofne hingamine.

NPP näitab ökosüsteemi netoproduksiooni, mis sõltub otseselt ökosüsteemi hingamisest. Mida väiksem on ökosüsteemi hingamine, seda väiksem hulk CO₂ emiteerub atmosfääri tagasi ning ökosüsteem saab käituda tugevama sidujana. NPP on positiivses korrelatsioonis kruusa osakaaluga ja negatiivses korrelatsioonis taimestikuga. Seos kinnitab, et mida suurem on taimestiku osakaal, seda efektiivsemalt suudab haljaskatus CO₂ siduda. Negatiivne seos samblaga kasvavate hariliku ja kamtsätka kukeharjade ning NPP vahel kinnitab, et sammal parandab kukeharjade võimet CO₂ siduda. Samal ajal seos NPP ja üksi kasvava hariliku kukeharja vahel on positiivne, mis näitab, et antud kukeharja liik võib katusel üksi kasvades käituda pigem süsihappegaasi allikana ega sobi hästi katusele kasvama, kui haljaskatuse eesmärgiks on õhust siduda CO₂.

Kokkuvõte

Haljaskatustele valitakse sageli kasvama kukeharjad, millest tulenevalt oli käesoleva bakalaureusetöö eesmärk hinnata, kuidas sammu mõjutab kolmest erinevast liigist kukeharjade võimet siduda CO₂. Lisaks sellele uuriti seoseid süsihappegaasi sidumise efektiivsuse ja ilmastikuparameetrite vahel.

Töö uuringuala oli Palamuse vallamaja ekstensiivne matipõhine haljaskatus. 2017. aasta maist oktoobrini kestnud süsihappegaasivoogude mõõtmisel kasutati dünaamilise suletud kambri meetodit. Uuringusse kuulusid kukeharjataimed kolmest erinevast liigist: kamtsatka, valge ja harilik kukehari. Uuringus mõõdeti nii üksiktaime kui samblaga koos kasvava taime gaasivooge, lisaks mõõdeti eraldi sambla ja kruusa vooge. CO₂ vooge mõõdeti läbipaistva, poolläbipaistva ja kaetud kambriga.

Mõõtmisperioodil suutis läbipaistva kambriga tehtud mõõtmistel, mis iseloomustab ökosüsteemi süsinikubilanssi, kõige rohkem CO₂ siduda samblaga kasvav kamtsatka kukehari (keskmiselt $-76,02 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) ning kõige vähem üksi kasvav valge kukehari ($-8,29 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$). Pimekambri mõõtmistel, mis iseloomustab ökosüsteemi hingamist, emiteeris kõige rohkem samblaga kasvav valge kukehari (keskmiselt $71,19 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) ja kõige vähem kruus ($2,61 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$). Tulemuste põhjal arvutati ökosüsteemi primaarproduktsoon (NPP), mis oli suurim samblaga kasvaval kamtsatka kukeharjal ($-67,31 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$). Kõik taimed suutsid samblaga kasvades efektiivsemalt siduda CO₂, mis tuleneb sambla omadusest tagada parem niiskuse režiim taimedele. Kamtsatka kukeharja kõrge sidumine on tingitud tema paksulehelise padjandina kasvamise vormist ja heast vee säilitusvõimest.

Ilmaparameetrite ja CO₂ voogude vahel seoste iseloomustamiseks loodi regressioonimudelid. Saadud võrrandite kõrgete determinatsioonikordajate põhjal võib öelda, et mudelid kirjeldavad hästi NPP-d ning pimekambri ja läbipaistva kambri CO₂ vooge Palamuse vallamaja katusel. Läbipaistva kambri vood olid enim mõjutatud niiskusest mullas, päikese kiirguse intensiivsusest ja suhteline õhuniiskusest. Pimedas kambri voogudele avaldasid mõju suhteline õhuniiskus, mis näitab niiskuse olulisust orgaanika lagunemisele mullas. Ökosüsteemi primaarproduktiooni määrasid taimestiku osakaal, mis kinnitab, et ühtlasema taimestikuga kaetud haljaskatused suudavad tõhusamalt CO₂ siduda.

Edasistes uuringutes haljaskatustel saab veel palju teha. Täpsemate seoste leidmiseks ökosüsteemi hingamise ja meteoroloogiliste parameetrite vahel tuleks eraldada autotroofne

ja heterotroofne hingamine. Samuti mõjutab taimede suutlikkust ekstreemsetes tingimustes ellu jääda lisaks ilmastikutingimustele juurestikku koloniseerivad mikroobid, kelle mõju ja suutlikkust katuse kukeharju koloniseerida tasuks samuti uurida. Konkreetsemad seosed tuleksid pikema mõõtmisperioodi jooksul eeldatavasti paremini välja.

Summary

The impact of weather and vegetation on the effectiveness of carbon sequestration on green roof

The Sedum plants are most frequent to grow on the green roof, therefore the aim of this bachelor's thesis was to evaluate, how the moss affects the effectiveness of Sedum plants from three different species to sequester carbon. In addition, the relationship between the carbon dioxide sequestration and meteorological parameters were investigated.

The study site was a mat based extensive green roof on Palamuse's Municipality House. The fluxes were measured from May to October in 2017 using the dynamic open chamber technique. Sedum plants from three different species were investigated: *S. acre*, *S. album*, *S. kamtschaticum*. The fluxes from a plant growing solo and together with moss were measured separately. Also, the fluxes from moss and a vegetation free area were measured. Fluxes were measured using transparent, semi-transparent and covered chamber.

During the measurement period, the highest NEE (net ecosystem exchange) values were measured from a *S. kamtschaticum* growing together with moss (mean $-76,01 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) and lowest from a *S. album* growing solo ($-9,29 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$). The highest ER (ecosystem respiration) values were measured from a *S. album* growing with moss (mean $71,19 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) and the lowest from an area without vegetation ($2,61 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$). Based on the results, the ecosystem net production (NPP) was calculated. It was the greatest for the *S. kamtschaticum* plant growing together with moss ($-67,31 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$). All the Sedum plants showed better CO_2 sequestration rates while growing together with moss. It can be explained by the moss's ability to ensure the sufficient moisture regime for the plants. The thick leaves of *S. kamtschaticum* increase the ability to retain water and can be the cause of high sequestration rate.

The regression equations were obtained to impress the relationships between meteorological parameters and CO_2 fluxes. Based on the models' high R^2 , it can be said that the models describe rather well the NPP, ER and NEE rates on the green roof in Palamuse. The NEE was most affected by the soil moisture, global radiation and relative humidity. The ER was influenced by relative humidity, which shows the importance of moisture for the degradation of organic matter in the soil. The NPP was mainly determined by the proportion of

vegetation, which confirms that green roofs covered with even vegetation can more effectively sequester CO₂.

In the future, to evaluate more accurate connections between ER and meteorological parameters the autotrophic and heterotrophic respiration should be measured separately. The plants ability to survive in extreme conditions is also affected by root colonizing microbes, whose effects and ability to colonize the roof should also be investigated. More specific connections between different factors and plants would probably come up in a longer period of measurement.

Tänuavaldused

Täna juhendajat Alar Teemuskit meisterliku juhendamise eest, kes leidis alati aega abistamiseks. Veel soovin tänada Ain Kulli, kes oli nõus igal ajal soovitusi jagama. Bakalaureusetöö valmimisele andsid oma panuse veel professor Ülo Mander ja Sten Mander ning Palamuse vallavalitsusest Andres Haagen. Aitäh teile!

Kasutatud allikad

- Awal, M. A., Ohta, T., Matsumoto, K., Toba, T., Daikoku, K., Hattori, S., Hiyama, T., & Park, H. (2010).** Comparing the carbon sequestration capacity of temperate deciduous forests between urban and rural landscapes in central Japan. *Urban Forestry & Urban Greening*, 9, 261–270.
- Berndtsson, J. C., Bengtsson, L., & Jinno, K. (2009).** Runoff water quality from intensive and extensive vegetated roofs. *Ecological Engineering*, 35, 369–380.
- Berndtsson, J.C. (2010).** Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: A review. *Ecological Engineering*, 36, 351–360.
- Besir, A. B., & Cuce, E. (2018).** Green roofs and facades: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 915–939.
- Braaker, S., Obrist, M. K., Ghazoul, J., & Moretti, M. (2017).** Habitat connectivity and local conditions shape taxonomic and functional diversity of arthropods on green roofs. *Journal of Animal Ecology*, 86, 521–531.
- Byrne, K. A., Kiely, G., & Leahy, P. (2005).** CO₂ fluxes in adjacent new and permanent temperate grasslands. *Agricultural and Forest Meteorology*, 135, 82–92.
- Chen, W. Y. (2015).** The role of urban green infrastructure in offsetting carbon emissions in 35 major Chinese cities: A nationwide estimate. *Cities*, 44, 112–120.
- Elmqvist, T., Fragkias, M., Goodness, J., Güneralp, B., Marcotullio, P.J., McDonald, R.I., Parnell, S., Schewenius, M., Sendstad, M., Seto, K.C., Wilkinson, C., eds (2013).** *Urbanization, Biodiversity and Ecosystem Services: Challenges and Opportunities*, Springer, Dordrecht.
- Getter, K. L., Rowe, D. B., Robertson, G. P., Cregg, B. M., & Andresen, J. A. (2009).** Carbon sequestration potential of extensive green roofs. *Environmental Science & Technology*, 43, 7564–7570.
- Gioli, B., Toscano, P., Lugato, E., Matese, A., Miglietta, F., Zaldei, A., & Vaccari, F. P. (2012).** Methane and carbon dioxide fluxes and source partitioning in urban areas: The case study of Florence, Italy. *Environmental Pollution*, 164, 125–131.

- Helfter, C., Tremper, A. H., Halios, C. H., Kotthaus, S., Bjorkegren, A., Grimmond, C. S. B., ... Nemitz, E. (2016).** Spatial and temporal variability of urban fluxes of methane, carbon monoxide and carbon dioxide above London, UK. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16, 10543–10557.
- Heusinger, J., & Weber, S. (2017a).** Extensive green roof CO₂ exchange and its seasonal variation quantified by eddy covariance measurements. *Science of The Total Environment*, 607–608, 623–632.
- Heusinger, J., & Weber, S. (2017b).** Surface energy balance of an extensive green roof as quantified by full year eddy-covariance measurements. *Science of The Total Environment*, 577, 220–230.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2000).** Land Use, Land-Use Change and Forestry. Robert T. Watson, Ian R. Noble, Bert Bolin, N. H. Ravindranath, David J. Verardo and David J. Dokken. Cambridge University Press, UK, 375 pp.
- International Energy Agency. (2012).** World Energy Outlook. Paris, France.
- Järveoja, J., Peichl, M., Maddison, M., Teemusk, A., & Mander, Ü. (2016).** Full carbon and greenhouse gas balances of fertilized and nonfertilized reed canary grass cultivations on an abandoned peat extraction area in a dry year. *GCB Bioenergy*, 8, 952–968.
- Keller, K. (2017).** Haljaskatuste gaasivoo sõltuvus katuse tüübist ja vanusest. Magistritöö. Tartu Ülikool.
- Kirschbaum, M. U. F., Eamus, D., Gifford, R. M., Roxburgh, S. H., & Sands, P. J. (2001).** Net Ecosystem Exchange. Cooperative Research Centre for Greenhouse Accounting, Australia.
- Lal, R. (2004).** Carbon emission from farm operations. *Environment International*, 30, 981–990.

- Mielnick, P., Dugas, W. A., Mitchell, K., & Havstad, K. (2005).** Long-term measurements of CO₂ flux and evapotranspiration in a Chihuahuan desert grassland. *Journal of Arid Environments*, 60, 423–436.
- Nordbo, A., Järvi, L., Haapanala, S., Wood, C. R., & Vesala, T. (2012).** Fraction of natural area as main predictor of net CO₂ emissions from cities. *Geophysical Research Letters*, 39.
- Novick, K. A., Stoy, P. C., Katul, G. G., Ellsworth, D. S., Siqueira, M. B. S., Juang, J., & Oren, R. (2004).** Carbon dioxide and water vapor exchange in a warm temperate grassland. *Oecologia*, 138, 259–274.
- Nowak, D. J., & Crane, D. E. (2002).** Carbon storage and sequestration by urban trees in the USA. *Environmental Pollution*, 116, 381–389.
- Nowak, D. J., Greenfield, E. J., Hoehn, R. E., & Lapoint, E. (2013).** Carbon storage and sequestration by trees in urban and community areas of the United States. *Environmental Pollution*, 178, 229–236.
- Oberndorfer, E., Lundholm, J., Bass, B., Coffman, R. R., Doshi, H., Dunnett, N., ... Rowe, B. (2007).** Green roofs as urban ecosystems: ecological structures, functions, and services. *BioScience*, 57, 823–833.
- Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos, & International Energy Agency (OECD). (2008).** World energy outlook 2008. Paris.
- Pétremand, G., Chittaro, Y., Braaker, S., Brenneisen, S., Gerner, M., Obrist, M. K., ... Moretti, M. (2018).** Ground beetle (Coleoptera: Carabidae) communities on green roofs in Switzerland: synthesis and perspectives. *Urban Ecosystems*, 21, 119–132.
- Porsche, U., & Köhler, M. (2003).** Life cycle costs of green roofs – A comparison of Germany, USA and Brazil. *RIO 3 – World Climate & Energy Event*. 461–467.
- Sailor, D. J. (2008).** A green roof model for building energy simulation programs. *Energy and Buildings*, 40, 1466–1478.

- Sari, D., & Bayram, A. (2014).** Quantification of emissions from domestic heating in residential areas of İzmir, Turkey and assessment of the impact on local/regional air-quality. *Science of The Total Environment*, 488–489, 429–436.
- Satterthwaite, D. (2008).** Cities' contribution to global warming: notes on the allocation of greenhouse gas emissions. *Environment and Urbanization*, 20(2), 539–549.
- Schreader, C. P., Rouse, W. R., Griffis, T. J., Boudreau, L. D., & Blanken, P. D. (1998).** Carbon dioxide fluxes in a northern fen during a hot, dry summer. *Global Biogeochemical Cycles*, 12(4), 729–740.
- Strohbach, M. W., Arnold, E., & Haase, D. (2012).** The carbon footprint of urban green space – A life cycle approach. *Landscape and Urban Planning*, 104(2), 220–229.
- Zhang, Z., Szota, C., Fletcher, T. D., Williams, N. S. G., Werdin, J., & Farrell, C. (2018).** Influence of plant composition and water use strategies on green roof stormwater retention. *Science of The Total Environment*, 625, 775–781.
- Zhao, J., Luo, T., Li, R., Wei, H., Li, X., Du, M., & Tang, Y. (2018).** Precipitation alters temperature effects on ecosystem respiration in Tibetan alpine meadows. *Agricultural and Forest Meteorology*, 252, 121–129.
- Teemusk, A., & Mander, Ü. (2009).** Greenroof potential to reduce temperature fluctuations of a roof membrane: A case study from Estonia. *Building and Environment*, 44(3), 643–650.
- Townsend-Small, A., & Czimczik, C. I. (2010).** Carbon sequestration and greenhouse gas emissions in urban turf. *Geophysical Research Letters*, 37(2).
- United Nations, & Department of Economic and Social Affairs. (2014).** World urbanization prospects. The 2014 Revision. New York, USA.
- Whittinghill, L. J. (2012).** Vegetable production using green roof technology and the potential impacts on the benefits provided by conventional green roofs. Doktoritöö. Michigan State University.
- Wong, N. H., Tay, S. F., Wong, R., Ong, C. L., & Sia, A. (2003).** Life cycle cost analysis of rooftop gardens in Singapore. *Building and Environment*, 38, 499–509.

Lisa 1. Gaasivoo mõõtmiseks paigaldatud rõngaste taimekooslused



Joonis 1. Rõngas kruusaga (autor: Alar Teemusk).



Joonis 2. Rõngas samblaga (autor Alar Teemusk).



Joonis 3. Rõngas hariliku kukeharjaga (autor Alar Teemusk).



Joonis 4. Rõngas samblaga kasvava hariliku kukeharjaga (autor Alar Teemusk).



Joonis 5. Rõngas valge kukeharjaga (autor Alar Teemusk).



Joonis 6. Rõngas samblaga kasvava valge kukeharjaga (autor Alar Teemusk).



Joonis 7. Rõngas kamtsätka kukeharjaga (autor Alar Teemusk).



Joonis 8. Rõngas samblaga kasvava kamtsätka kukeharjaga (autor Alar Teemusk).

Lisa 2. Ilmastikuparameetrite ja CO₂ vaheliste seoste uurimiseks programmiga Statistica koostatud korrelatsioonitabel (lühendid on toodud Metoodika peatükis)

Correlations (Sheet1 in Imported from D:\pime_ja_labipaistva_kambri_statistika_andmed2.xls)																											
Marked correlations are significant at p < 0.05000																											
N=80 (Casewise deletion of missing data)																											
Variable	DOY	Labipaistev_CO2	Pime_CO2	NPP	T_2N	T_7P	T_1P	T_MP	T_M	S_2N	S_7P	S_1P	RN_7P	RN_1P	N_M	EJ_M	PK_7P	PPS_7P	H_KH_S_%	H_KH_U_%	K_KH_S_%	K_KH_U_%	KR%	S%	V_KH_S_%	V_KH_U_%	Taim_%
DOY	1.0000	-2784	-1378	-4681	-5761	-6070	-5636	-4821	5401	5638	5144	5638	4914	4914	4914	4914	4914	4914	4914	4914	4914	4914	4914	4914	4914	4914	4914
Labipaistev_CO2	p=0.01	1.0000	p=0.01	p=0.01	p=0.01	p=0.01	p=0.01	p=0.01	p=0.01	p=0.01	p=0.01	p=0.01	p=0.01	p=0.01	p=0.01	p=0.01	p=0.01	p=0.01	p=0.01	p=0.01	p=0.01	p=0.01	p=0.01	p=0.01	p=0.01	p=0.01	p=0.01
Pime_CO2	-3662	p=0.01	1.0000	p=0.01	p=0.01	p=0.01	p=0.01	p=0.01	p=0.01	p=0.01	p=0.01	p=0.01	p=0.01	p=0.01	p=0.01	p=0.01	p=0.01	p=0.01	p=0.01	p=0.01	p=0.01	p=0.01	p=0.01	p=0.01	p=0.01	p=0.01	p=0.01
NPP	-2784	p=0.01	-1546	8556	0714	1834	2257	2326	1922	2505	0051	2683	-2878	0726	3479	2527	3465	2142	0056	4251	056	004	162	1820	1981	1884	1602
T_2N	-4681	p=0.01	1.0000	-6437	1760	1445	1906	1494	1894	2006	0001	1525	-3239	1322	0207	0428	1928	1445	0056	4251	056	004	162	1820	1981	1884	1602
T_7P	-5761	p=0.01	1.0000	-6437	1760	1445	1906	1494	1894	2006	0001	1525	-3239	1322	0207	0428	1928	1445	0056	4251	056	004	162	1820	1981	1884	1602
T_1P	-6070	p=0.01	1.0000	-6437	1760	1445	1906	1494	1894	2006	0001	1525	-3239	1322	0207	0428	1928	1445	0056	4251	056	004	162	1820	1981	1884	1602
T_MP	-5636	p=0.01	1.0000	-6437	1760	1445	1906	1494	1894	2006	0001	1525	-3239	1322	0207	0428	1928	1445	0056	4251	056	004	162	1820	1981	1884	1602
T_M	-4821	p=0.01	1.0000	-6437	1760	1445	1906	1494	1894	2006	0001	1525	-3239	1322	0207	0428	1928	1445	0056	4251	056	004	162	1820	1981	1884	1602
S_2N	5401	p=0.01	1.0000	-6437	1760	1445	1906	1494	1894	2006	0001	1525	-3239	1322	0207	0428	1928	1445	0056	4251	056	004	162	1820	1981	1884	1602
S_7P	2076	p=0.01	1.0000	-6437	1760	1445	1906	1494	1894	2006	0001	1525	-3239	1322	0207	0428	1928	1445	0056	4251	056	004	162	1820	1981	1884	1602
S_1P	-1282	p=0.01	1.0000	-6437	1760	1445	1906	1494	1894	2006	0001	1525	-3239	1322	0207	0428	1928	1445	0056	4251	056	004	162	1820	1981	1884	1602
RN_7P	8498	p=0.01	1.0000	-6437	1760	1445	1906	1494	1894	2006	0001	1525	-3239	1322	0207	0428	1928	1445	0056	4251	056	004	162	1820	1981	1884	1602
RN_1P	5144	p=0.01	1.0000	-6437	1760	1445	1906	1494	1894	2006	0001	1525	-3239	1322	0207	0428	1928	1445	0056	4251	056	004	162	1820	1981	1884	1602
N_M	5638	p=0.01	1.0000	-6437	1760	1445	1906	1494	1894	2006	0001	1525	-3239	1322	0207	0428	1928	1445	0056	4251	056	004	162	1820	1981	1884	1602
EJ_M	4914	p=0.01	1.0000	-6437	1760	1445	1906	1494	1894	2006	0001	1525	-3239	1322	0207	0428	1928	1445	0056	4251	056	004	162	1820	1981	1884	1602
PK_7P	-8267	p=0.01	1.0000	-6437	1760	1445	1906	1494	1894	2006	0001	1525	-3239	1322	0207	0428	1928	1445	0056	4251	056	004	162	1820	1981	1884	1602
PPS_7P	-6313	p=0.01	1.0000	-6437	1760	1445	1906	1494	1894	2006	0001	1525	-3239	1322	0207	0428	1928	1445	0056	4251	056	004	162	1820	1981	1884	1602
H_KH_S_%	-0000	p=0.01	1.0000	-6437	1760	1445	1906	1494	1894	2006	0001	1525	-3239	1322	0207	0428	1928	1445	0056	4251	056	004	162	1820	1981	1884	1602
H_KH_U_%	-0000	p=0.01	1.0000	-6437	1760	1445	1906	1494	1894	2006	0001	1525	-3239	1322	0207	0428	1928	1445	0056	4251	056	004	162	1820	1981	1884	1602
K_KH_S_%	-0000	p=0.01	1.0000	-6437	1760	1445	1906	1494	1894	2006	0001	1525	-3239	1322	0207	0428	1928	1445	0056	4251	056	004	162	1820	1981	1884	1602
K_KH_U_%	-0000	p=0.01	1.0000	-6437	1760	1445	1906	1494	1894	2006	0001	1525	-3239	1322	0207	0428	1928	1445	0056	4251	056	004	162	1820	1981	1884	1602
KR%	-0000	p=0.01	1.0000	-6437	1760	1445	1906	1494	1894	2006	0001	1525	-3239	1322	0207	0428	1928	1445	0056	4251	056	004	162	1820	1981	1884	1602
S%	-0000	p=0.01	1.0000	-6437	1760	1445	1906	1494	1894	2006	0001	1525	-3239	1322	0207	0428	1928	1445	0056	4251	056	004	162	1820	1981	1884	1602
V_KH_S_%	-0000	p=0.01	1.0000	-6437	1760	1445	1906	1494	1894	2006	0001	1525	-3239	1322	0207	0428	1928	1445	0056	4251	056	004	162	1820	1981	1884	1602
V_KH_U_%	-0000	p=0.01	1.0000	-6437	1760	1445	1906	1494	1894	2006	0001	1525	-3239	1322	0207	0428	1928	1445	0056	4251	056	004	162	1820	1981	1884	1602
Taim_%	-0000	p=0.01	1.0000	-6437	1760	1445	1906	1494	1894	2006	0001	1525	-3239	1322	0207	0428	1928	1445	0056	4251	056	004	162	1820	1981	1884	1602

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Annette Kägu,
(Sünniaeg: 30.09.1996)

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose
„Ilmastiku ja taimeistiku mõju CO₂ sidumise efektiivsusele haljaskatusel”

mille juhendaja on PhD Alar Teemusk,

- 1.1. reprodutseerimiseks säilitamise ja üldsusele kättesaadavaks tegemise eesmärgil, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace-is lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
- 1.2. üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tartu Ülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace'i kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.
2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Tartus, 30. mai 2018